

Antti Alahäivälä

Sähköautojen lataaminen ja sen vaikutus kaupunkialueen jakelumuuntajiin

Sähkötekniikan korkeakoulu

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi
diplomi-insinöörin tutkintoa varten Espoossa 8.10.2012.

Työn valvoja:

Prof. Matti Lehtonen

Työn ohjaaja:

DI Eero Saarijärvi



Aalto-yliopisto
Sähkötekniikan
korkeakoulu

Tekijä: Antti Alahäivälä

Työn nimi: Sähköautojen lataaminen ja sen vaikutus kaupunkialueen
jakelumuuntajiin

Päivämäärä: 8.10.2012

Kieli: Suomi

Sivumäärä:8+93

Sähkötekniikan laitos

Professori: Siirtotekniikka, suurjännitetekniikka ja sähköjärjestelmät

Koodi: S-18

Valvoja: Prof. Matti Lehtonen

Ohjaaja: DI Eero Saarijärvi

Sähkö nähdään yhtenä vaihtoehtona korvaamaan perinteisiä polttoaineita liikenteessä. Sen avulla voitaisiin vähentää henkilöautoliikenteen kasvihuonekaasupäästöjä sekä energiankulutusta. Tämän takia sähköautojen käyttöönottoa tuetaan nykyään ympäri maailmaa ja niitä tutkitaan paljon. Tämä työ tehtiin osana tutkimusprojektia, joka pyrkii kehittämään toimivia latausinfrastruktuuriratkaisuja sähköautoille.

Useat tutkimukset ovat tuoneet esille lataamiseen liittyviä ongelmia, joita ovat muun muassa sen aiheuttama sähkönladun heikkeneminen ja verkostokomponenttien ylikuormittuminen. Tässä työssä tavoitteena oli tutkia sähköautojen latausta sähköverkon kannalta. Tavoitteena oli muodostaa simulointimalli, joka laskee uskottavasti sähköauton lataustarpeen ja -ajan erilaisissa tilanteissa, kuten ladattaessa eri paikoissa tai ohjattaessa latausta. Muodostettuja latauskäyriä käytettiin edelleen tutkittaessa jakelumuuntajien kuormittumista sähköautojen eri penetraatioilla eri tilanteissa.

Lataamisen mallintamisessa hyödynnettiin Monte Carlo -simulointia. Pääasiallisena lähtöaineistona käytettiin vuosina 2010 – 2011 toteutettua Valtakunnallista henkilöliikennetutkimusta, jossa on tutkittu ihmisten liikkumiskäyttäytymistä. Jakelumuuntajien kuormittumista tutkittaessa hyödynnettiin todellisia muuntajatietoja pääkaupunkiseudulta.

Saatujen tulosten perusteella lataamisen vaikutus jakelumuuntajiin riippuu oleellisesti muuntajan käyttäjäryhmien jakaumasta niin ohjaamattomana kuin ohjattuna. Lataamisen ohjaus saattaa kasvattaa muuntajan huipputehoa joillain alueilla verrattuna ohjaamattomaan lataukseen. Lisäksi ohjaus voi aiheuttaa selvän teho-
piikin verkkoon, jos monta autoa alkaa ladata yhtäaikaaisesti.

Avainsanat: Sähköauto, lataaminen, ohjaaminen, Monte Carlo -simulointi, jakelumuuntaja

Author: Antti Alahäivälä

Title: Electric vehicle charging and its impact on distribution transformers in urban area

Date: 8.10.2012

Language: Finnish

Number of pages:8+93

Department of Electrical Engineering

Professorship: Transmission, High Voltage Engineering and Power Systems

Code: S-18

Supervisor: Prof. Matti Lehtonen

Instructor: M.Sc. (Tech.) Eero Saarijärvi

Electricity is considered as a possible solution to replace traditional fuels in transportation. It could reduce the emission of greenhouse gasses and improve the overall energy efficiency. Therefore, the introduction of electric cars is supported all over the world and they are studied extensively. This thesis was written as a part of a research project, which aims to develop practical solutions for electric vehicle charging infrastructure.

Several studies have highlighted problems, such as decline in power quality and overloading of grid components, in electric grid due to the electric vehicle charging. In this thesis, the aim was to study electric vehicle charging and its network impacts as well. A simulation model capable to compute needed daily charging energy and time for an electric car was implemented. Simulations can be performed with different initial parameters when the charging is uncontrolled or controlled. As a result, daily charging power curves for electric cars were formed and used to study the loading of distribution transformers with different electric car penetrations.

The implemented statistical simulation model is based on the Monte Carlo -method. It utilizes Finnish National Travel Survey 2010 – 2011 as a main input data. The distribution transformer data for the loading computation was real transformer data from Finnish Capital Region.

According to the results of the thesis, the impact of charging on the transformers depends significantly on the customer classes using a transformer. The study included uncontrolled and controlled charging. The controlled charging may increase the peak power of a transformer compared to uncontrolled charging in some regions. In addition, the controlled charging may cause significant power peak in the grid if several cars start to charge simultaneously.

Keywords: Electric vehicle, charging, control, Monte Carlo -simulation, distribution transformer

Esipuhe

Diplomityö on tehty Aalto-yliopiston Sähkötekniikan korkeakoulun Sähkötekniikan laitoksella sähköjärjestelmien tutkimusryhmässä. Työ tehtiin osana eSINi-projektia, joka pyrkii mahdollistamaan ja tukemaan sähköautojen tuloa Suomeen.

Ensin haluan kiittää diplomityön valvojaa professori Matti Lehtosta työn aiheesta. Aiheen avulla olen päässyt tutustumaan sähköautoiluun ja seuraamaan sen esiaskelia Suomessa. Suuri kiitos ohjaajalleni DI Eero Saarijärvelle tuesta, avusta ja mielenkiinnosta.

Kiitos myös muuntajatiedoista. Niiden avulla sain työhöni huomattavasti mielekkyyttä.

Lisäksi haluaisin kiittää työkavereitani tuesta ja avusta sekä läheisiäni, jotka ovat jaksaneet kuunnella ääneen pohdiskeluani.

Otaniemi, 8.10.2012

Antti Alahäivälä

Sisältö

Tiivistelmä	ii
Tiivistelmä (englanniksi)	iii
Esipuhe	iv
Sisällysluettelo	v
Symbolit ja lyhenteet	vii
1 Johdanto	1
2 Sähköautoilun nykytilanne ja tulevaisuus	3
2.1 Nykytilanne Suomessa	3
2.2 Tulevaisuus Suomessa	4
3 Sähköautojen teknologia	6
3.1 Sähköautoteknologioita	6
3.1.1 Lataushybridit	6
3.1.2 Täyssähköautot	7
3.2 Sähköauton latausjärjestelmä	9
3.3 Akkuteknologia	11
4 Latausjärjestelmä	14
4.1 Lataustavat ja -teknologiat	14
4.2 Latauspaikat	17
4.3 Laskutus- ja maksamismenetelmät	18
4.4 Latauksen ohjaaminen	19
5 Lataamisen vaikutus sähköverkkoon	23
5.1 Verkko vaikutukset	23
5.1.1 Vaikutus sähkön laatuun	23
5.1.2 Verkon kuormituksen kasvun vaikutus	25
5.2 Vaikutukset keskijänniteverkossa	26
5.3 Vaikutukset pienjänniteverkossa	27
5.3.1 Verkon kuormituksen kasvun vaikutus	27
5.3.2 Vaikutus sähkön laatuun	28
6 Liikennetutkimus	30
6.1 Valtakunnallinen henkilöliikennetutkimus	30
6.2 Sähköautojen tuomat muutokset autoiluun	34
7 Lataamisen mallintaminen	36
7.1 Nykyinen kuormitusmalli	36
7.2 Sähköautoon liittyvä tyyppikuormituskäyrä	39

7.3	Mallissa käytetty lähtödata	41
7.4	Tutkittavat ohjausmenetelmät	43
7.5	Mallin muodostaminen	44
7.5.1	Monte Carlo -simuloinnit	44
7.5.2	Käytetty algoritmi	45
7.6	Verifiointi ja validointi	49
7.7	Simulointimallilla saatuja latauskäyriä	52
8	Jakelumuuntajien kuormittumisen tutkiminen	57
8.1	Tutkittavat jakelumuuntajat	57
8.2	Sähköautojen sijoittaminen jakelumuuntajille	59
8.3	Tutkimusmenetelmät ja -tavoitteet	59
8.4	Tulokset	62
8.4.1	Asuinalueet	62
8.4.2	Palvelualue ja työpaikka-alueet	65
8.4.3	Latauksen ohjaaminen	66
9	Johtopäätökset	68
10	Yhteenveto	71
	Liite A	80
	A Tuntikeskitehojen jakaumien normaalisuus	80
	Liite B	81
	B Parametrien varioinnin vaikutus latauskäyrissä	81
	Liite C	83
	C Simulointimallilla saatuja latauskäyriä	83
	Liite D	86
	D Muuntajien kuormittuminen asuinalueilla	86
	Liite E	91
	E Muuntajien kokonaiskuormien muodostuminen palvelualueella ja työpaikka-alueilla	91
	Liite F	93
	F Muuntajien kokonaiskuormien muodostuminen ohjattaessa	93

Symbolit ja lyhenteet

Symbolit

d	päivä
EC	energian hinta
F	diskreetti kertymäfunktio
F^{-1}	diskreetin kertymäfunktion käänteisfunktio
F_{EQA}	muuntajan eristysten vanhenemiskerroin
h	tunti
i	indeksi
$i_{2V,\mu}$	tuntikeskiteho ulkoindeksi
$i_{\text{vrk},\mu}$	tuntikeskitehon sisäindeksi
$i_{\text{vrk},\sigma}$	keskihajonnan sisäindeksi
j	indeksi
k	tyyppien määrä
L_c	estimaatti käyttäjätyypin normeeratulle tuntienenergialle
m	kuukausi
μ_P	käyttäjän tuntikeskiteho
N	kokonaisluku
n	tyyppiin kuuluvien sähkönkäyttäjien määrä
P	latausteho
P_{max}	huipputeho
p	todennäköisyys satunnaismuuttujan arvolle
ρ	korrelaatio
$\bar{\rho}$	keskimääräinen korrelaatio sähkönkäyttäjien tuntikeskitehojen välillä
R	satunnaisluku
s_c	estimaatti käyttäjätyypin normeeratulle tuntienenergian hajonnalle
SP	sähkön tuntihinta
σ	keskihajonta
$\bar{\sigma}$	keskihajonnan keskiarvo
σ_P	käyttäjän tuntikeskitehon keskihajonta
σ^2	tuntikeskitehon varianssi
$\bar{\sigma}^2$	tuntikeskitehon varianssin keskiarvo
T	satunnaismuuttujan saamien arvojen äärellinen joukko
t	ajanhetki
t_a	lataamisen aloitushetki
t_b	lataamisen lopetushetki
U	jänniteyliaallon amplitudin suhde jännitteen perusaaltoon
W	vuosienergia
$W_{a,c}$	käyttäjän vuosienergia
W_{sum}	vuosienergioiden summa
$W_{h,c}$	käyttäjän tuntienenergia
X	satunnaismuuttuja
x	satunnaismuuttujaan liitettävä arvo
z	luottamuskerroin

Operaattorit

$Cov()$	kovarianssi
$E()$	odotusarvo
$E\{\}$	estimaattori normeeratulle tuntienenergialle
$\min\{\}$	minimointi
$s\{\}$	estimaattori normeeratulle tuntienenergian hajonnalle
$Var()$	varianssi

Lyhenteet

ACEA	European Automobile Manufacturers' Association, Euroopan autonvalmistajien yhteistyöjärjestö
AMR	Automatic Meter Reading, automaattinen mittarinluenta
BEV	Battery Electric Vehicle, täyssähköauto
BMS	Battery Management System, akunhallintajärjestelmä
DSM	Demand Side Management, kysynnän hallinta
EMI	Electromagnetic Interference, sähkömagneettinen häiriö
EN	European Standard, Eurooppalainen standardi
EU	Euroopan unioni
EV	Electric Vehicle, täyssähköauto
FEV	Full Electric Vehicle, täyssähköauto
HSD	Hybrid Synergy Drive, Toyotan kehittämä täyshybridijärjestelmä
IEA	International Energy Agency
IEC	International Electrotechnical Commission
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
NaNiCl	Natrium-nikkelikloridi
NEDC	New European Driving Cycle, autojen testaamiseen kehitetty ajosykli
OCV	Open Circuit Voltage, avoimen piirin jännite
PFC	Power Factor Correction, tehokertoimen korjaus
PHEV	Plug-in Electric Vehicle, lataushybridi
RFID	Radio Frequency Identification, radiotaajuinen tunnistus
SFS	Suomen Standardisoimisliitto
SLY	Sähkölaitosyhdistys
SOC	State-of-Charge, varausaste
THD	Total Harmonic Distortion, kokonaissärökerroin
TSECC	TÜV Süd-E-Car-Cycle, sähköautojen testaamiseen kehitetty ajosykli
V2G	Vehicle-to-Grid

1 Johdanto

Vuonna 2011 saatiin todistaa, kun maailman väestö kasvoi yli seitsemän miljardin. Tämän väkimäärän elintason noustessa kasvaa huoli ympäristöstä jatkuvasti. Jonkinlainen tasapaino ihmisten ja luonnon välillä on saavutettava ilmaston keskilämpötilan noustessa ja luonnonvarojen vähentyessä. Eri menetelmät vaihtelevat ihmisten kulutustottumusten muuttamisesta teknologian kehitykseen ja kokonaan uusiin teknologioihin.

Liikenne on yksi energiankuluttaja, jonka kulutusta ja päästöjä voitaisiin leikata. Vuonna 2008 liikenne kulutti noin viidenneksen maailman koko energiankulutuksesta ja suurimman osan nestemäisistä polttoaineista, joiden käytön oletetaan vielä lisääntyvän tulevaisuudessa. Oletettu lisääntyminen johtuu liikenteestä, jossa nestemäiset polttoaineet tarjoavat parhaan energialähteen muiden teknologioiden puuttuessa. [1] Kaikista energiankäyttöön liittyvistä hiilidioksidipäästöistä liikenteen osuus on noin neljännes [2].

International Energy Agency (IEA) mukaan liikenteen kulutuksen ja päästöjen leikkaamiseen on kuitenkin hyvät edellytykset etenkin henkilöautoliikenteessä, joka aiheuttaa jo nykyään merkittävän osan liikenteen kulutuksesta ja päästöistä. Osuuden arvellaan vielä kasvavan tulevaisuudessa. Keinoja leikkaamiseen ovat muun muassa nykyisen polttomoottoritekniikan parantaminen sekä sähkön käyttö auton energialähteenä. Sähkön osuuden liikenteen käyttämästä energiasta arvellaan lisääntyvän etenkin vuoden 2020 jälkeen. Tärkeimmät teknologiat ainakin aluksi tulevat olemaan lataushybridit (Plug-in Electric Vehicle, PHEV) sekä täyssähköautot (Electric Vehicle (EV), Battery Electric Vehicle (BEV), Full Electric Vehicle (FEV)). [2]

Lataushybridit voivat saada käyttövoimansa sekä poltto- että sähkömoottorista. Ne eroavat tavallisesta hybridiautosta kuitenkin siinä, että huomattava osa ajokilometreistä pyritään ajamaan verkosta ladattavalla sähköllä. Tämän takia niissä voi nykyään olla akkukapasiteettia esimerkiksi 6 – 10 kWh (20 – 50 km). Täyssähköautot taas toimivat pelkästään verkosta ladattavalla sähköllä. Niiden akkukapasiteetti voi vaihdella esimerkiksi 15 ja 30 kWh:n välillä (100 – 150 km). [3]

Vaikka aika sähköautojen yleistymiselle on otollinen mielenkiinnon niitä kohtaan kasvaessa ja hallitusten suosiessa niitä verohelpotuksilla [1], yleistymiselle on silti haasteita. Etenkin täyssähköautojen tapauksessa autojen akut ovat vielä liian kalliita, painavia ja niiden kapasiteetti on liian pieni. Jos teknologia ei kehity, täyssähköautojen osuus saattaa jäädä marginaaliseksi. Asiaa pahentaa kehittymätön julkinen latausjärjestelmä. Kattava julkinen latausjärjestelmä tekisi sähköauton käytöstä joustavaa akkukapasiteetin ollessa riittämätön. [4]

Sähköautotkin voivat aiheuttaa ongelmia. Jos sähköverkosta ladattavien autojen määrä kasvaa, sähköverkko voi kohdata ongelmia. Useat tutkimukset ovat todenneet, että ohjaamattomassa sähköautojen latauksessa latauksen huipputeho ajoittuisi ilta-aikaan, jolloin verkossa esiintyy tehohuippu ilman lataustakin. Tämä aiheuttaa verkossa muun muassa lisähäviöitä, jännitteenalenemisiä sekä muuntajien ja

johtimien ylikuormittumista. Vaikutukset tulevat olemaan todennäköisesti erilaisia verkon eri jänniteportaissa. Sähköautojen alkaessa yleistyä verkkovaikutukset näkyvät todennäköisesti ensimmäisenä pienjänniteverkossa.

Tässä työssä tutkitaan sähköautojen latausta ja sen verkostovaikutuksia sekä menetelmiä vähentää ei-toivottuja vaikutuksia. Valtakunnallisen henkilöliikennetutkimuksen [5] pohjalta saadaan tietoa henkilöauton kuljettajien vuorokauden aikaisesta käyttäytymisestä. Tämän tiedon avulla pyritään mallintamaan sähköautojen vuorokauden aikainen lataamistarve, -aika ja -paikka. Mallintamisessa hyödynnetään Monte Carlo -simulointia, joka on tehokas tapa tutkia monimutkaisia stokastisia systeemejä. Malliin sisällytetään myös mahdollisuus ohjata latausta viivästäällä sekä sähkönn hinnan mukaan. Simuloinnin tuloksena saadaan tutkittavan tyyppiselle sähköautolle jokaiselle vuorokauden tunnille keskimääräiset lataustehot ja näiden hajonnat.

Mallintamalla saatuja latauksen tuntitehokäyriä hyödyntäen tutkitaan useiden todellisten jakelumuuntajien kuormittumista eri sähköautopenetraatioilla. Pääasiassa keskitytään tutkimaan viittätoista asuinalueille sijoitettua jakelumuuntajaa, mutta mukana on lisäksi kaksi työpaikka-alueen ja yksi palvelualueen muuntaja. Laskennan tarkoituksena on saada tietoa yleisellä tasolla, kuinka simuloidut latauskäyrät summautuvat muuntajan peruskuormaan ja kuinka lataus vaikututtaa muuntajan huipputehoon ja käyttökertoimeen. Summautumista tutkitaan eri tilanteissa, kuten sähköautojen ladatessa vain kotona tai lisäksi kodin ulkopuolella eri tehoilla sekä tilanteessa, jossa kotilatausta ohjataan.

Tämä työ jakautuu kolmeen osaan: taustateoriaa käsittelevään osaan (luvut 2 – 6), latausmallin muodostamiseen (luku 7) sekä muuntajien kuormittumisen tutkimiseen (luku 8). Taustateoriassa käsitellään sähköautoilun nykytilannetta ja tulevaisuutta Suomessa sekä sähköautoihin liittyvää teknologiaa. Lisäksi käsitellään sähköautoihin liittyvän latausinfrastruktuurin rakennetta, lataamisen vaikutuksia sähköverkkoon sekä henkilöautoilua. Latausmallin muodostamisen yhteydessä käydään läpi nykyisten usein verkostolaskennassa käytettävien tyyppikuormituskäyrien muodostamista, sähköautoiluun liittyviä lataajatyyppejä sekä tutkitaan mallin toimivuutta. Jakelumuuntajien kuormittumista tutkittaessa esitellään tutkittavat kohteet, sijoitellaan niihin ladattavat autot sekä käydään läpi laskennan kulku ja tulokset.

2 Sähköautoilun nykytilanne ja tulevaisuus

Tässä luvussa esitellään sähköautoilun tilaa Suomessa. Nykyään sähköautoilu on vielä kehittymätöntä, mutta sen tutkiminen ja sähköautojen saamat kannustimet ovat lisääntymässä Suomessakin. Sähköautojen määrän arvellaan kasvavan merkittävästi vuoden 2020 jälkeen.

2.1 Nykytilanne Suomessa

Sähköautoilu on vasta kehityksensä alkuvaiheessa Suomessa: niiden osuus autokannasta on erittäin pieni ja julkisia latauspakkoja on hyvin vähän. Suomi on harvaanastuttu ja monilla alueilla julkinen liikenne on kehittymätöntä tai kannattamatonta, jolloin henkilöautoilu on keskeinen liikkumismuoto. Etenkin kaupunkien ulkopuolella ajomatkat saattavat kuitenkin olla niin pitkiä, että täyssähköauto olisi epäkäytännöllinen. Vaihtoehdoksi jää lataushybridi, tai täyssähköauton hankkiminen toiseksi autoksi. Suomen tilannetta vaikeuttavat myös matalat lämpötilat, jotka voivat vaikuttaa sähköautoilun etuihin ja auton käytännöllisyyteen. Tästä huolimatta tutkimustoiminta ja sähköautojen tukeminen ovat lisääntymässä.

Valtakunnallisen henkilöliikennetutkimuksen [5] mukaan keskimääräinen henkilöauton kuljettajana ajettu vuorokausimatka on noin 20 km, minkä perusteella huomattava osa matkoista olisi ajettavissa sähköautolla. Tämä saa etenkin kaupungit näyttämään hyvältä ympäristöltä sähköautoille. Lisäksi kaupungeissa julkinen lataus on mielekkäämpää järjestää pienille sähköautomäärille yhden tolpan hyödyttäessä useampaa autoa.

Yrityksien ja korkeakoulujen kiinnostus sähköautoiluun on kasvanut viime vuosien aikana. Tutkimus tähtää aina uusien teknologioiden ja menetelmien kehittämisestä sähköautoiluun liittyvän liiketoiminnan kehittämiseen. Tutkimus on kuitenkin vasta alkuvaiheessa ja se on kansainvälisesti vertailtuna vielä hyvin pienimuotoista. Sähköajoneuvoklusteriin soveltuvia yrityksiä on Suomessa noin 40. Näistä yrityksistä kaikki eivät ole kuitenkaan sisällyttäneet sähköautoilua vielä tulevaisuuden suunnitelmiinsa, mutta soveltuvat siihen osaamisensa puolesta. [6]

Viime vuosina valtio on antanut helpotuksia sähköautojen verotukseen ja osa kunnista on alkanut suosia sähköautoja. Suomen ajoneuvovero koostuu kahdesta osasta: perusverosta ja käyttövoimaverosta. Vuonna 2011 perusveroa alennettiin autoilta, joiden käyttövoima on yksinomaan sähkö. Vuoden 2012 alussa käyttövoimaveroa alennettiin kaikilta sähköä edes osaksi käyttövoimanaan käyttäviltä autoilta. Useissa kunnissa on käynnistetty hankkeita sähköautojen käyttöönoton tukemiseksi. Esimerkiksi Helsingin kaupunki on alentanut pysäköintimaksuja vähäpäästöisiltä autoilta [3].

2.2 Tulevaisuus Suomessa

Sähköautojen yleistymiselle on laadittu skenaarioita niin Suomessa kuin maailmalla. Suomessa ennustamista vaikeuttaa kuitenkin nykyisin alan kehittymättömyys ja pienuus. Kehitystä tulevat ohjaamaan nykyinen autokanta ja sen muutosnopeus, eri tahojen tukitoimet, polttoaineiden hintakehitys, mielikuvat sähköautoilusta ja monet muut tekijät.

Suomen tasolla kehitystä tulevat ohjaamaan merkittävästi valtion ja Euroopan unionin (EU) päätökset. EU on asettanut vuodelle 2020 niin sanotun 20/20/20-tavoitteen, jolla pyritään leikkaamaan kasvihuonekaasupäästöjä, lisäämään uusiutuvan energian osuutta ja parantamaan energiatehokkuutta. Tavoitteen toteutumista pyritään ohjaamaan asetuksin ja direktiivein. Nämä eivät suoranaisesti viittaa sähköautoihin, mutta todennäköisesti tulevat osaltaan edistämään sähköautojen käyttöä. EU:n komission antamassa tiedonannossa eurooppalaisesta puhtaiden ja energiatehokkaiden ajoneuvojen strategiasta sähköautot nähdään kuitenkin lupaavana vaihtoehtona vuoden 2020 tavoitteiden saavuttamiseksi. [3]

Suomessa Liikenne- ja viestintäministeriö on tehnyt linjauksia ja tavoitteita liikenteen päästöjen vähentämiseksi vuoteen 2020. Tärkeimpänä menetelmänä pidetään autokannan uudistamista, mutta myös biopolttoaineiden käyttöä pyritään kiihdyttämään. Sähköautojen arvellaan yleistyvän vasta vuoden 2020 jälkeen, joten niillä ei nähdä olevan merkitystä tavoitteiden saavuttamisen kannalta. Valtioneuvoston ilmasto- ja energiastrategiassa vuoteen 2050 kuitenkin visioitiin autokannan sähköistymisellä olevan merkitystä päästöjen vähentämisessä. [3]

Työ- ja elinkeinoministeriö on laatinut vuonna 2009 julkaistussa selvityksessään kolme skenaariota sähköautojen yleistymiselle: perus, nopea ja hidas skenaario. Skenaarioissa on tarkasteltu erikseen lataushybridejä ja täyssähköautoja, sillä kuluttajilla arvellaan olevan pienempi kynnys siirtyä lataushybrideihin kuin täyssähköautoihin. Yleistymisskenaarioiden lähtökohtana on käytetty ajoneuvon kannattavuutta kuluttajalle verrattuna polttomoottori- tai dieselautoon. Kannattavuudessa on huomioitu auton hankintahinta sekä käyttökustannukset vuoden 2010 hinta- ja kustannustiedoilla. Lisäksi yleistymiseen oletetaan vaikuttavan hintojen kehityksen, kuluttajien suhtautumisen sähköautoiluun, kannustimien sekä autokannan uusiutumisen. [7]

Kustannusanalyysien perusteella lataushybridi olisi kustannustehokas ratkaisu noin puolelle Suomalaisista. Perusskenaariossa ensimmäisten lataushybridien oletetaan tulevan markkinoille vuonna 2010 ja niiden oletetaan syrjäyttävän tasaisesti bensiini- ja dieselautoja niin, että lataushybridien osuus on 10 % uusista autoista vuonna 2020. Täyssähköautojen oletetaan seuraavan lataushybridejä noin viiden vuoden viiveellä. Nopeassa skenaariossa sähköautojen yleistymisen tapahtuu perusskenaariota nopeammin esimerkiksi tukitoimien vaikutuksesta. Vuonna 2020 lataushybrideitä olisi 40 % uusista autoista ja täyssähköautoja 40 % uusista autoista vuonna 2030. Hitaassa skenaariossa hintakehityksen ja autojen saatavuuden on oletettu olevan hitaampaa verrattuna edellä esitettyihin skenaarioihin. Tällöin lataushybridien osuus uusista autoista olisi 20 % ja täyssähköautojen 10 % vuonna 2030. [7] Yhteenveto

skenaarioista on esitetty taulukossa 1.

Taulukossa 1 esitettyjen skenaarioiden pohjalta voidaan arvioida sähköautojen osuutta koko autokannasta. Vuoden 2011 lopussa Suomessa oli rekisterissä 2 978 729 henkilöautoa ja vuoden aikana kasvu oli 3,5 %. Lisäksi tiedetään, että henkilöautomäärän kasvu on ollut melko tasaista viimeisen kymmenen vuoden ajan. [8] Näiden tietojen perusteella voidaan arvioida autokannan suuruutta vuosina 2020 ja 2030. Vuonna 2020 henkilöautoja on arviolta neljä miljoonaa ja vuonna 2030 kuusi miljoonaa, jos henkilöautojen määrän kasvu säilyy nykyisellään. Sähköautojen osuudet henkilöautoista on esitetty taulukossa 1. Todellisuudessa on mahdollista esimerkiksi autoilun kallistuessa, että henkilöautojen määrä ei kasva yhtä nopeasti, jolloin sähköautojen osuudet olisivat tulevaisuudessa suuremmat näillä skenaarioilla.

Taulukko 1: Perus, nopea ja hidas skenaario lataushybridien ja täyssähköautojen yleistymiselle Suomessa. [7], [8]

Skenaario	Vuosi	Osuus uusista autoista [%]		Kumulatiivinen myyntimäärä [kpl]		Osuus henkilöautoista [%]	
		PHEV	EV	PHEV	EV	PHEV	EV
Perus	2020	10	3	66000	13000	2	0,3
	2030	50	20	480000	160000	8	3
Nopea	2020	40	6	190000	26000	5	0,6
	2030	60	40	960000	450000	16	8
Hidas	2020	5	2	38000	12000	1	0,3
	2030	20	10	207000	92000	4	2

3 Sähköautojen teknologia

Tässä luvussa käsitellään lataushybridien ja täyssähköautojen toimintaperiaatteet lyhyesti sekä joitain kaupallisten sähköautojen yleisiä teknisiä ominaisuuksia. Luvussa esitellään koeajoissa sähköautoille saatuja kulutuksia ja toimintasäteitä eri lämpötiloissa ja verrataan valmistajien ilmoittamiin. Lisäksi esitellään akkulaturin toimintaa sekä nykyisiä akkuteknologioita. Tässä luvussa esitettäviä lukuarvoja hyödynnetään myöhemmin työssä tehtävissä simuloinneissa.

3.1 Sähköautoteknologioita

3.1.1 Lataushybridit

Markkinoilta löytyy erilaisia hybriditeknikoita, joilla pyritään vähentämään auton polttoaineen kulutusta. Yksinkertaisimmassa muodossaan tämä tarkoittaa vain jarrutusenergian talteenottoa, mutta nykyään hybridiautot voivat hyödyntää ajettaessa pelkästään sähkömoottoria tai sähkö- ja polttomoottoria. Viimeisimpänä hybriditeknologiana henkilöautoihin ovat tulleet lataushybridit, joiden akusto voidaan ladata sähköverkosta. Kyseisten autojen kuluttamasta energiasta osa on siis peräisin sähköverkon kautta toimitetusta sähköstä. [3]

Autosta riippuen markkinoilta löytyy kaksi kilpailevaa teknologiaa lataushybrideille: sarja- ja rinnakkaishybriditeknologiat sekä näiden yhdistelmät. Sarjahybrideissä ajaminen tapahtuu koko ajan sähköllä polttomoottorilla pyöritettävän generaattorin ladataksa akustoa. Rinnakkaishybrideissä ajaminen taas voi tapahtua sekä sähkö- että polttomoottorilla. Akusto on mitoitettu niin, että siihen mahtuvan sähkövarauksen avulla voidaan ajaa osa jokapäiväisistä ajoista. Päästöt ja polttoaineen kulutus saadaan pieniksi, mutta toimintasäde riittää pitkiin matkoihin tarvittaessa akuston koon pysyessä pienenä ja hinnan alhaisena. Lataushybrideiden etujen ansiosta niiden määrän oletetaan kasvavan täyssähköautoja nopeammin lähitulevaisuudessa. [3]

Taulukossa 2 on esitetty kahden markkinoilla olevan lataushybridin, Opel Amperan ja Toyota Priuksen, teknisiä ominaisuuksia. Kumpikin autoista on täysikokoinen henkilöauto, mistä huolimatta niiden suorituskyky on hieman taulukossa 3 esitetyjä täyssähköautoja parempi. Akuston kapasiteetti riittää kattamaan huomattavan osan henkilöautolla ajettavista päivittäisistä matkasuoritteista (luku 6.1). Autoista Ampera hyödyntää sarjahybriditeknologiaa ja Prius Toyotan omaa täysybridijärjestelmää (Hybrid Synergy Drive, HSD), joka on rinnakkaishybriditeknologian eräs muoto.

Taulukko 2: Lataushybridien teknisiä tietoja. [9], [10]

	Opel Ampera	Toyota Prius
Teho [kW]	111	60
Vääntö [Nm]	370	207
Kiihtyvyys [s] (0 – 100 km/h)	9,0	11,4
Huippunopeus [km/h]	160	180
Toimintasäde [km] (sähköllä)	60	23
Akku	Litium-ion	Litium-ion
Kapasiteetti [kWh]	16	4,4
Kulutus [kWh/km]	0,27	0,19

3.1.2 Täyssähköautot

Täyssähköautot saavat käyttövoimansa nimensä mukaisesti vain sähköstä. Tällöin niissä käytetään suurempia akustoja kuin lataushybrideissä mahdollisimman pitkän toimintasäteen takaamiseksi. Vaikka ainoastaan sähköön hyödyntäminen voi tehdä autosta täysin päästöttömän, samalla se tekee täyssähköautoista hieman ongelmallisia. Tämä johtuu kehittymättömästä akkuteknologiasta, jonka takia autoon ei saada kelvollista kantamaa ilman suurta, painavaa ja kallista akustoa. Täyssähköautoille onkin ennustettu hybridejä hitaampaa yleistymistä, mikä johtuu pitkälti teknologian kehittymättömyydestä. [7] Tästä huolimatta jotkut autovalmistajat ovat jo aloittaneet täyssähköautojen sarjatuotannon, ja monilla valmistajilla sellaiset ovat tulossa.

Täyssähköautossa keskeisiä komponentteja ovat akusto, sähkömoottori, moottorin ohjausjärjestelmä sekä akuston laturi. Energia otetaan auton omaan energiavarastoon laturin kautta. Tehoelektroniikkaa ja sen ohjausta käytetään sähköenergian käsittelyyn, jotta se saadaan akustosta moottorin käyttämään muotoon ja toisaalta jarrutuksessa takaisin akustoon. [3] Tekniikka tarjoaa täyssähköautoille tavalliseen perheautoon verrattavan kiihtyvyyden ja Suomen teille riittävän huippunopeuden, mutta toimintasäde jää melko pieneksi. Taulukko 3 esittää eräiden sarjatuotannossa olevien (Zoe tulee myyntiin syksyllä 2012 [11]) täyssähköautojen teknisiä tietoja. Citroën C-Zeroa markkinoidaan myös nimillä Mitsubishi i-MiEV ja Peugeot iOn.

Taulukossa 3 on listattu täyssähköautojen kulutuksia. Kyseiset arvot ovat laskettu valmistajien ilmoittamasta toimintasäteestä ja akuston kapasiteetista. Toimintasäteet on mitattu käyttäen standardoitua New European Driving Cycleä (NEDC). NEDC koostuu kaupunkiajoa jäljittelevästä syklistä ECE15 (keskinopeus 18,7 km/h) sekä laajennettua kaupunkiajoa jäljittelevistä sykleistä EUDC (keskinopeus 62,6 km/h) [15]. Kyseinen sykli vaikuttaa kuitenkin antavan hieman optimistisia lukemia autojen toimintasäteille. Esimerkiksi Tekniikan Maailman testissä Nissan Lea-

Taulukko 3: Täyssähköautojen teknisiä tietoja. [12], [13], [14]

	Citroën C-Zero	Nissan Leaf	Renault Zoe
Teho [kW]	49	80	65
Vääntö [Nm]	180	240	220
Kiihtyvyys [s] (0 – 100 km/h)	15,9	11,9	-
Huippunopeus [km/h]	130	145	135
Toimintasäde [km]	150	175	201
Akku	Litium-ion	Litium-ion	Litium-ion
Kapasiteetti [kWh]	16	24	22
Kulutus [kWh/km]	0,11	0,14	0,11

filie toimintasäteeksi saatiin noin 100 km ja pakkasella noin 60 km [16].

Lehdistä löytyy vastaavanlaisia testiajoja sähköautoille jo useita. Nissan Leafin kaupunkiajotestissä kulutukseksi ilman lämmityslaitteen käyttöä saatiin 0,22 kWh/km ja lämmityksen ollessa täysillä 0,35 kWh/km. Ulkolämpötila oli ajon aikana noin +4°C. Maantieajossa ajettaessa tasaista sadan kilometrin tuntivauhtia kulutukseksi saatiin 0,23 kWh/km, kun lämmitys oli säädetty +17°C:een. [17] Citroenin C-Zerolle on ajettu myös hieman vastaavanlainen testi. Sen kulutukseksi saatiin yhdistelmäajossa 0,13 kWh/km ja 0,12 kWh/km. Matka sisälsi kaupunki ja moottoritieajoa, jonka aikana huippunopeus oli rajoitettu 70 km/h, ja matka ajettiin kahteen kertaan +10°C:n lämpötilassa. Erikseen mitattiin kulutus vielä rajummassa ajossa (moottoritiellä nopeus 120 km/h). Tällöin kulutukseksi saatiin 0,23 kWh/km. [18]

Edellisen perusteella vaikuttaa, että käytännön ajossa autojen kulutukset ovat valmistajien ilmoittamia kulutuksia suuremmat etenkin käytettäessä lämmitystä. Toisin kuin polttomoottoriautoissa, sähköautoissa ei juuri synny moottorin hukkalämpöä sen moottorin hyötysuhteen ollessa korkea, jolloin auton lämmittäminen (sisätilat ja akusto) kylmällä säällä täytyy toteuttaa erillisellä lämmittimellä. Suomen kylmä ilmasto tulee siis aiheuttamaan sähköautoilulle haasteita. Laurikko et al. [15] tutkivat lämpötilan ja ajosyklin vaikutusta auton hyötysuhteeseen, joka on laskettu akustosta renkasiin tai sähköverkosta renkasiin. Laskettaessa lämpötilaa +23°C:sta -7°C:een ja ajettaessa NEDC-syklin mukaan hyötysuhde huononi noin 12 % (akustosta renkasiin). Jos lämpötilaa edelleen laskettiin, hyötysuhde huononi entisestään. Tulee huomata, että -7°C ei ole vielä Suomen oloissa kovin matala lämpötila. Lisäksi tutkimuksessa määritettiin hyötysuhteita (sähköverkosta renkasiin) eri ajosykleillä. Maantieajossa saavutettiin noin 60 % hyötysuhteita, kun taas kaupunkiajossa alle 50 %:n.

Saksalainen autolehti Auto, Motor und Sport tutki taulukossa 4 esitettyjen sähköautojen toimintasäteen muutosta matalassa lämpötilassa. Taulukon arvot ovat peräisin Helsingin Sanomien kyseisestä tutkimuksesta tekemästä tiivistelmästä [19]. Ajosyklinä käytettiin sähköautoille kehitettyä TÜV Süd-E-Car-Cycleä (TSECC), jo-

ka vastaa kaupunki- ja maantieajon yhdistelmää (keskinopeus 60 km/h). Taulukosta 4 nähdään, että toimintasäde on pienentynyt pahimmillaan puoleen valmistajan ilmoittamasta, kun lämpötila on matala. Muutenkin mitatut toimintasäteet ovat yhtä poikkeusta lukuun ottamatta valmistajien ilmoittamia pienemmät.

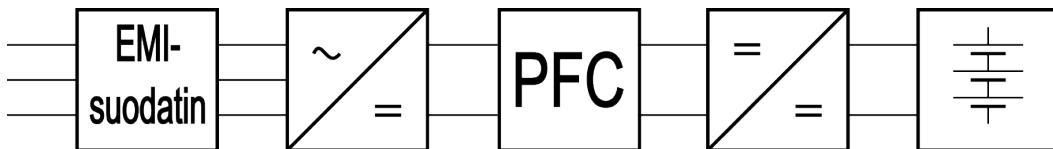
Taulukko 4: Eräiden sähköautojen koeajoissa mitatut toimintasäteet. Muutos on laskettu mitatuista toimintasäteistä. [19]

Auto	Toimintasäde			Muutos [%]
	Valmistajan ilmoittama [km]	Mitattu +23°C [km]	Mitattu -7°C [km]	
Fiat 500 EV	140	132	105	-20
Mia Electric	120	100	93	-7
Mitsubishi i-MiEV	144	113	64	-43
Smart fortwo ED	135	159	84	-47

3.2 Sähköauton latausjärjestelmä

Sähköverkon kannalta oleellinen osa sähköautoa on akuston lataamiseen käytettävä laturi. Siihen liittyviä ominaisuuksia ovat muun muassa latausjännite, -virta, tehokerroin, hyötysuhde sekä yliaallot ja muut häiriöt. Yleensä sähköautoissa on sisäinen laturi, joka soveltuu hitaaseen yksivaiheiseen lataukseen tai puolinopeaan kolmivaiheiseen lataukseen. Nopeaan ja suuritehoiseen lataukseen tarvitaan ulkoinen laturi. Auton sisäisen ja ulkoisen laturin lisäksi voitaisiin periaatteessa moottoria syöttävää tehoelektroniikkaa hyödyntää myös ulkoisessa latauksessa. [7] Lisäksi yhtenä latausteknologiana on tutkittu induktiivista eli johdotonta latausta [3].

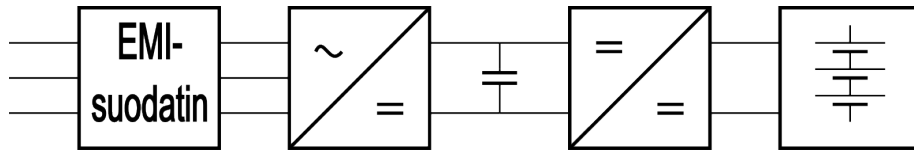
Laturin perustehtävä on muuntaa sähköverkon vaihtosähkö akuston ottamaksi tasasähköksi ja säätää sitä latauksen aikana. Tyypillisesti kirjallisuudessa esitetyt laturit ovat periaatteeltaan kuvan 1 mukaisia. Verkosta katsottuna laturi koostuu EMI-suodattimesta (Electromagnetic Interference), tasasuuntaajasta, tehokertoimen korjaimesta (PFC) ja hakkuriteholähteestä. Tavallinen tasasuuntaajaratkaisu on yksitai kolmivaiheinen diodisilta. Tämän ratkaisun huonona puolena ovat tasajännitteen ja verkkovirtaan tulevat yliaallot, huono tehokerroin sekä vaihtosuuntausmahdollisuuden puuttuminen. Huono tehokerroin johtuu verkkovirran yliaalloista sekä käytännössä myös pienestä kommutointiviiveestä. Tavallisesti diodisiltoihin liitetään



Kuva 1: Laturin periaatteellinen kuva. Lohkot vasemmalta: EMI-suodatin, tasasuuntaaja, tehokertoimen korjaus, hakkuriteholähde ja akusto.

tehokertoimen korjaus, jotta verkosta otettavan virran laatu paranee ja tehokerroin saadaan hyväksi. Hakkuriteholähdettä käytetään säätämään akuston jännitettä. Sen toteuttamiseen on olemassa useita topologioita. EMI tarkoittaa tehoelektronikkalaitteen ympäristöönsä säteilemään korkeataajuisia häiriötä. EMI-suodatinta käytetään vähentämään tätä säteilyä ja näin vähentämään laturin itselleen ja ympäristölleen aiheuttamia häiriöitä. [20]

Toisen laturirakenteen periaate on esitetty kuvassa 2. Tämä vaihtoehto käyttää diodien sijasta itsekommutoivia kytkimiä, jolloin siltaa voidaan käyttää vaihtosuuntaukseen ja verkkovirran käyrämuotoa parantaa ilman omaa piiriä tehokertoimen korjaukselle.



Kuva 2: Periaatteellinen kuva laturista, jonka tasasuuntaus perustuu itsekommutoiviin kytkimiin. Lohkot vasemmalta: EMI-suodatin, tasasuuntaaja, hakkuriteholähde ja akusto.

Kirjallisuudessa [21], [22] on esitetty itsekommutoiviin kytkimiin perustuvia topologioita korvaamaan perinteistä dioditasasuuntausta ja tehokertoimen korjausta. Ensimmäisessä tutkimuksessa pyritään parantamaan laturin hyötysuhdetta ja jälkimmäisessä pidentämään laturin elinikää. Kummassakin tapauksessa hyötysuhteet ovat parhaimmillaan yli 90 % ja tehokerroin lähellä yhtä (ilmoitettu vain lähteessä [22]).

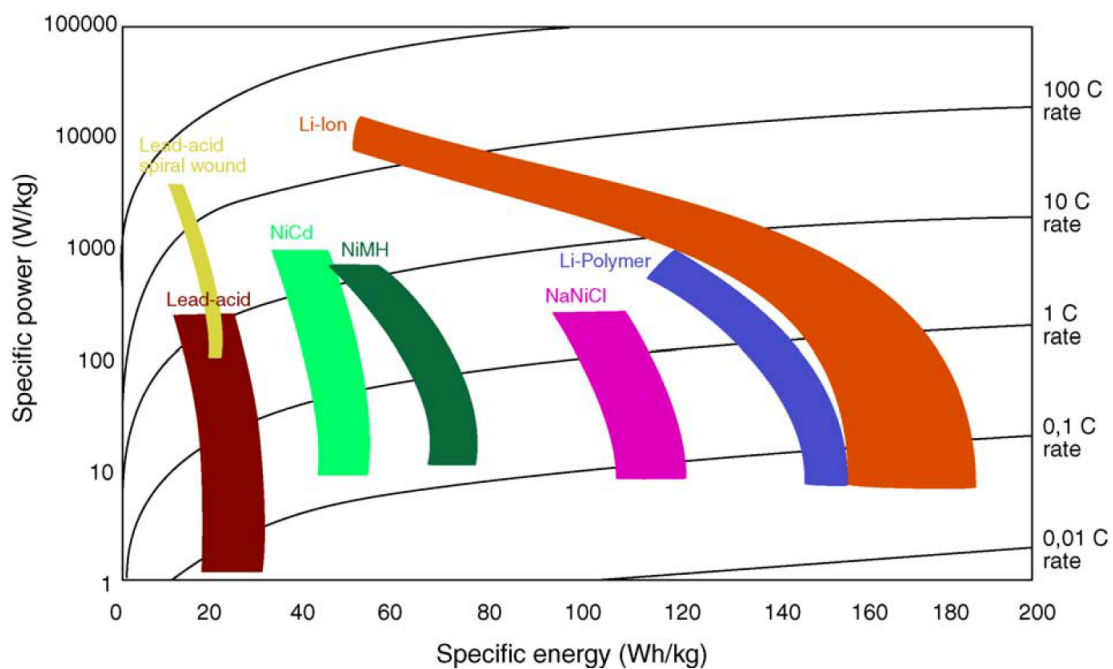
Älykkäässä sähköverkossa sähköautot nähdään energiavarastoina, joiden akustojen kapasiteettia ja varausta voidaan käyttää verkon tehotasapainon ylläpitämiseen. Akustosta voitaisiin siis esimerkiksi ottaa sähköä verkon huippukuorman aikana (Vehicle-to-grid, V2G). Tämä edellyttää auton laturilta tasasuuntauksen lisäksi myös mahdollisuutta vaihtosuuntaukseen. [23] Laturin periaatteellinen kytkentä on kuvan 2 mukainen. Mahdollisia laturin topologioita on käsitelty tarkemmin esimerkiksi lähteissä [24] ja [25]. Kummassakin lähteessä suuntaajaksi on ehdotettu muun muassa kolmivaiheista kokosilta-kytkentää, jossa on itsekommutoivat kytkimet.

Autossa olevien laturien teho voisi käytännössä vaihdella esimerkiksi 2 kW:n ja 22 kW:n välillä, joista edellinen tapahtuisi yksivaiheisesti rajoitetulla virralla ja jälkimmäinen kolmivaiheisesti 32 A:n sulakkeella (luku 4.1). Nopeaa latausta varten esimerkiksi Citroen C-Zerossa [12] ja Nissan Leafissa [13] on oma pikalatauspistoke, josta auto voidaan ladata 50 kW:n teholla ulkoisen laturin avulla. Tämä vastaa siis lataustapaa neljä (luku 4.1).

3.3 Akkuteknologia

Täyssähköautojen markkinoille tuloa ja myyntiä hidastaa merkittävästi akkuteknologian kehittymättömyys. Sähköautoilun kannalta akkujen oleellisia parametreja ovat energiatiheyttä kuvaavat suureet Wh/kg ja Wh/l, tehotiheyttä kuvaava suure W/kg sekä latauskertojen lukumäärä. Suureet siis kuvaavat akun varastointi- ja tehonanto-ominaisuuksia sekä käyttöikä. Luonnollisesti energia- ja tehotiheys sekä käyttöikä pyritään saamaan mahdollisimman suuriksi, mutta kehitys on kuitenkin ollut hidasta ja näitä parametreja joudutaan lisäksi optimoimaan käyttötarkoituksen mukaan. Hybrideissä ja täyssähköautoissa akkuja pyritään optimoimaan erilailla, mikä saattaa johtaa valmistuksessa kompromisseihin. Karkeasti esitettynä täyssähköautojen akuilla halutaan hyvä energiatiheys, kun taas hybrideille hyvä energia- ja tehotiheys. [26]

Kuvassa 3 on vertailtu kilpailevia akkuteknologioita. Sen vaaka-akseli kuvaa energiatiheyttä ja pystyakselit tehotiheyttä. Lisäksi pystyakselilla on C-arvo eli akun virran ja varauksen suhde, joka kertoo käytännössä, kuinka suurella virralla akkua voidaan kuormittaa. Jokainen kuvan alue esittää tiettyä kemiallista paria, mutta on useita tapoja toteuttaa varsinainen akku, mikä kasvattaa eriväristen alueiden kokoa. Kuvan 3 perusteella litiumakut vaikuttavat parhailta sähköautosovelluksiin. Nähdään myös, että natrium-nikkelikloridiakun (NaNiCl), joka tunnetaan myös nimellä Zebra, ominaisuudet ovat hyvät. Teknologian ongelmana on kuitenkin sen vaatima korkea lämpötila, mikä tarkoittaisi sähköautoissa energiakulutuksen kasvua. [27]

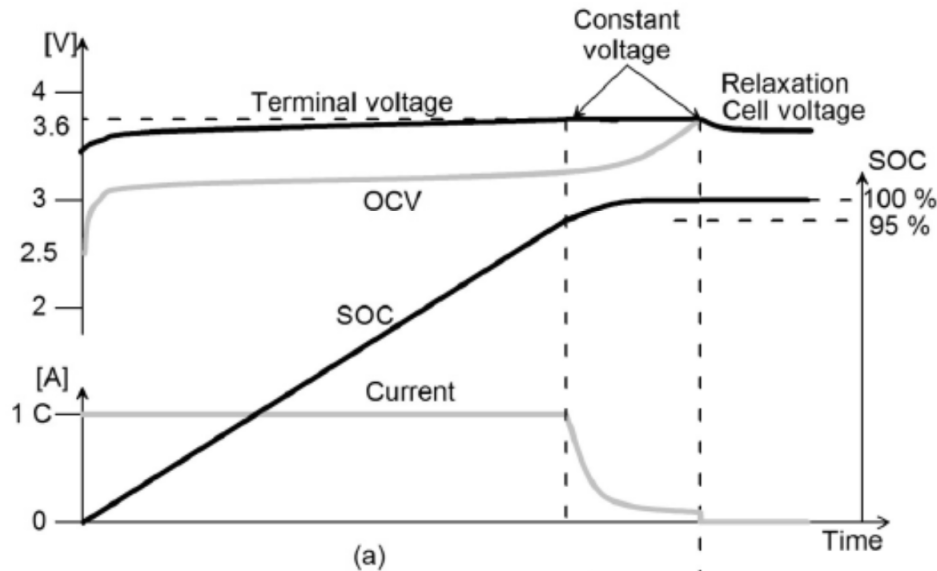


Kuva 3: Akkuteknologioiden vertailu. Vaaka-akselilla energiatiheys ja pystyakseleilla tehotiheys sekä C-luku. [27]

Litiumakut ovat nykyään sähköautoteollisuudessa johtava teknologia ja niissä nähdään potentiaalia myös tulevaisuutta ajatellen. Litiumakkuihin liittyy erilaisia kato-di-, anodi- ja elektrolyyttivaihtoehtoja. Nykyään katodimateriaaleina käytetään muun muassa litium-koboltti-oksidia ja litium-rautafosfaattia, joka on uusi ja lupaava materiaali. Anodimateriaaleina käytetään yleisimmin erilaisia hiilen muotoja. Uutena ja lupaavana anodimateriaalina pidetään litiumtitanaattia. Elektrolyytteinä käytetään yleisesti jotain orgaanista liuotinta tai litiumsuolaa. [3], [28]

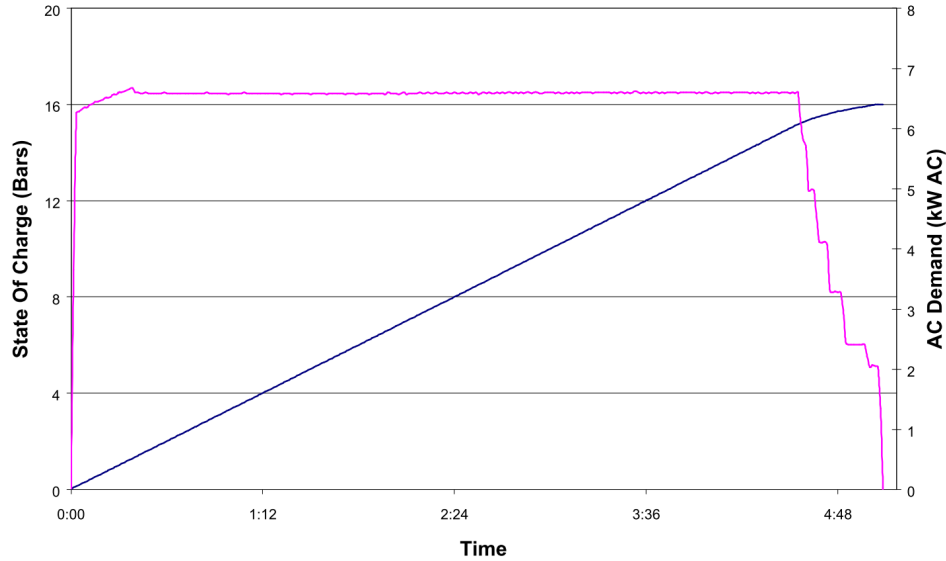
Auton akusto koostuu yksittäisistä sarjaan ja rinnan kytketyistä akkukennoista. Jotta akustoa voidaan käyttää tehokkaasti ja turvallisesti, sen toimintaa täytyy valvoa ja ohjata. Tämän takia akusto tarvitsee tuekseen akunhallintajärjestelmän (Battery Management System, BMS). Sen tehtäviin voi kuulua muun muassa akuston valvonta, suojaus, tilan estimointi ja suorituskyvyn maksimointi. Koska akuston kennojen välillä on aina valmistuksesta johtuvia eroja, niitä täytyy valvoa yksitellen, jotta ne eivät pääse esimerkiksi ylikuumentumaan tai -latautumaan. [29]

Verkon kannalta on kiinnostavaa latauksen aikainen virta ja jännite, jotka laturi ottaa verkosta. Akkujen tehokkaaseen lataamiseen on kehitetty eri menetelmiä. Litiumakkujen lataamiseen käytetään perinteisesti vakiovirta-vakiojännitemenetelmää [29], [30], [31], [32]. Lataus tapahtuu aluksi vakiovirralla, kunnes saavutetaan litiumkennojen maksimijännitetaso. Tämän jälkeen akku ladataan loppuun vakiojännitteellä. Kuvassa 4 on esitetty kyseistä menetelmää käytettäessä latausvirta, kennojännite, avoimen piirin jännite (Open Circuit Voltage, OCV) ja varausaste (State-of-Charge, SOC) ajan funktiona latauksen aikana. Virta ja jännite ovat lähes vakioita suurimman osan latauksesta. [29]



Kuva 4: Litiumakun lataaminen vakiovirta-vakiojännitemenetelmällä. [29]

Kuvassa 5 on esitetty eräässä latauskokeessa litiumakulle saatu latausprofiili. Nähdään, että teho on likimain vakio suurimman osan latauksesta. Latauksen alussa varausaste on 5 % ja lopussa 100 %. [33] On siis perusteltua olettaa, että sähköauto ottaa verkosta likimain vakiotehon koko latauksen ajan.



Kuva 5: Latauksen teho (vaaleanpunainen) ja SOC (sininen) ajan funktiona litiumakulle. [33]

Etenkin Suomen ilmastossa akkujen käyttöä vaikeuttaa niiden toiminnan lämpötila-alue. Esimerkiksi litiumakun, jossa on grafiittianodi, lämpötila-alue latauksessa on välillä $5 - 40^{\circ}\text{C}$ [34]. Tällöin siis akusto täytyy lämmittää kylmillä keleillä ennen latausta. Lämmittäminen lisää verkosta otettavan energian määrää ja toisaalta rajoittaa lataukseen käytettävää tehoa. Lisäksi litiumakun kapasiteetti pienenee alhaisissa lämpötiloissa [35], mikä rajoittaa täyssähköauton käyttöä entisestään kylmällä.

4 Latausjärjestelmä

Tässä luvussa käsitellään sähköauton latausta sekä siihen liittyvää latausinfrastruktuuria. Edellisessä luvussa käsiteltiin latausta lähinnä sähköauton kannalta, mutta siihen liittyy myös monia kysymyksiä, osia ja osapuolia auton ulkopuolella. Toimivan järjestelmän kannalta standardit ja niihin pohjautuvat teknologiaratkaisut ovat oleellisia. Käytännöllisyyden ja turvallisuuden lisäksi lataamisen tulee olla mahdollista oikeissa paikoissa ja siitä maksamisen tulee olla riittävän yksinkertaista. Lisäksi sähköautojen lataus on tulevaisuudessa potentiaalinen sähköverkon ohjattava kuorma, jonka ohjaus ei saa haitata liikaa autoilua.

4.1 Lataustavat ja -teknologiat

Sähköautojen lataamiseen liittyviä oleellisia standardeja ovat muun muassa latausjärjestelmän yleiset vaatimukset määrittelevä EN 61851-1:2011 sekä sähköauton pistokytimen rakenne- ja testausvaatimukset määrittelevä IEC 62196-2:2011. Yleisiä vaatimuksia koskeva standardi määrittelee sähköautoille neljä lataustapaa, jotka käsitellään seuraavissa kappaleissa. [36]

Lataustapa 1 on kevyiden sähköajoneuvojen latausta kotitalouspistorasiasta. Lataus on yksivaiheinen mitoitusvirralla 16 A. Tapa edellyttää vikavirtasuojauksen käyttöä, jotta henkilö- ja paloturvallisuus varmistuvat.

Lataustapa 2 on sähköajoneuvon lataus normaalista yksivaiheisesta kotitalouspistorasiasta. Verkosta otettava virta tulee kuitenkin rajoittaa sopivalle tasolle, kuten 8 ampeeriin, 16 A tai 32 A sijasta. Tällöin siis normaalitilanteessa latausteho on noin 2 kW. Suomen oloissa tämä lataustapa tulee todennäköisesti olemaan merkittävä sähköautojen alkaessa yleistyä, sillä autojen esilämmittämiseen tarkoitettuja pistorasioita löytyy noin 1,5 miljoonaa eri kiinteistöjen pihoilta [37]. Ladattaessa näistä pistorasioista on virran rajoittaminen oleellista, sillä niitä ei ole johtojen ja sulakkeiden puolesta välttämättä mitoitettu 16 A:n jatkuvalle latausvirralle [38].

Lataustapa 3 on sähköajoneuvon lataus erityisestä sähköautopistorasiasta yksi- tai kolmivaiheisesti. Verkosta otettavaksi virraksi valitaan syöttöverkon mitoituksen mukaan joko 16, 32 tai 63 A. Käytettävät latauspistokkeet ja rasiat on määritelty tarkemmin standardissa IEC 62196-2:2011. Latausjärjestelmä mahdollistaa myös kommunikoinnin auton ja verkon välillä, jolloin monipuolinen kuormanohjaus sekä tehon syöttö verkkoon ovat mahdollista. Lataustapa vaatii siis erilliset sähköautokäyttöön suunnitellut latauslaitteet eikä siksi ole suoraan mahdollista kotona. Tavalla tulee todennäköisesti olemaan merkitystä julkisilla latauspaikoilla sekä kotilatauksessa.

Lataustapa 4 on sähköajoneuvon pikalataus tasasähköllä. Latausteho voi vaihdella kymmenistä aina satoihin kilowatteihin. Tämä tapa vaatii erillisen tasasähkölaturin, joka sijaitsee auton ulkopuolella. Lataustavalla tulee olemaan todennäköisesti merkitystä pikalatausasemilla ja ammattiliikenteessä.

Tapojen lisäksi sähköajoneuvojen lataus voidaan luokitella sen ajallisen keston mukaan kolmeen luokkaan: hidas ja puolinopea lataus sekä pikalataus. Hidas lataaminen tapahtuu alle 16 A virralla, puolinopea 16 – 32 A virralla ja pikalataus tästä suuremmilla virroilla. [7] Hidas lataus kestää siis muun muassa virrasta, akkujen koosta ja varaustilanteesta riippuen esimerkiksi 5 – 10 tuntia ja puolinopea alle tunnista muutamaan tuntiin. Pikalataus voi lataustehon ollessa suuri tapahtua muutamassa minuutissa. Ajallinen jako on hyvin karkea sen riippuessa auton, laturin ja syöttävän sähköverkon ominaisuuksista.

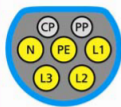
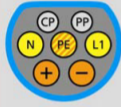

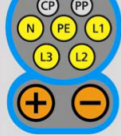
Standardi IEC 62196-2:2011 listaa kolme pistoketyyppiä sähköajoneuvojen lataamiseen. Näistä tyypin 2 pistoke on todennäköinen Euroopassa käyttöön tuleva pistoketyyppi Euroopan autonvalmistajien yhteistyöjärjestön (European Automobile Manufacturers' Association, ACEA) suositellessa sitä julkiseen lataukseen ja kotilataukseen. [39] Pistokkeeksi on ehdolla Saksalaisen Mennekesin innovoima pistoketyyppi, joka kykenee AC- ja DC-lataukseen. Kyseinen pistoke on esitetty kuvassa 6.



Kuva 6: Ehdokas tyypin 2 pistokkeeksi. [40]

Pistokkeessa on seitsemän nastaa, joista kaksi ohjausnastaa ja maadoitus pysyvät kaikissa kytkennöissä samana ja loput neljä vaihtelevat sen mukaan, onko kyseessä yksivaiheinen, kolmivaiheinen vai tasavirtalataus. Tarkemmat yhdistelmävaihtoehdot on esitetty kuvassa 7.

Kuten edellä ilmeni, lataustapa 3 vaatii erillisen liitäntäyksikön ja tapa 4 ulkoisen laturin. Liitäntäyksikön ideana on valvoa turvallista latausta sekä parantaa ohjaus- ja maksumahdollisuuksia. Useat valmistajat ovat tuoneet markkinoille latauspiste- vaihtoehtoja niin kotona tapahtuvaan kuin julkiseen lataukseen. Suomessa latauspisteitä myyvät esimerkiksi Ensto Finland Oy [41] ja GARO Finland Oy [42]. Heidän tuotteensa soveltuvat maksulliseen ja maksuttomaan lataukseen. GAROn maksulliseen lataukseen soveltuvat latausasemat toimivat tekstiviestillä tai parkkiautomaatin yhteydessä. Enston tarjoamissa latauspylväissä asiakkaan tunnistus tapahtuu matkapuhelimella tai RFID-kortilla (Radio Frequency Identification, radiotaajuinen

AC & DC Charging Couplers Type 2		
	AC single to three phases	max. 500V AC 3 x 63A or 1 x 80A
	AC single to three phases DC-Low	max. 500V AC / DC 3 x 63A AC or 1 x 70A AC or 1 x 80A DC
	DC-Mid	max. 500V DC 1 x 140A
	DC-High	≥ 500V DC 1 x 200A

www.MENNEKES.de

Kuva 7: Mennekesin innovoiman pistokkeen kytkentämahdollisuudet. [40]

tunnistus). Pylväistä saadaan tarvittaessa yhteys ulkoisiin tietojärjestelmiin tai esimerkiksi parkkiautomaattiin.

Useissa markkinoilla tarjotuissa latauspisteissä on mahdollistettu latauksen ohjaaminen. Esimerkiksi Schneider Electricin tarjoamissa kotilatauspisteissä on mahdollisuus ajastettuun lataamiseen sekä lataamiseen sähkön hinnan mukaan [43]. Siemens taas on mahdollistanut latauksen viivästyttämisen [44]. Valmistajat tarjoavat siis ohjaustapoja, jotka perustuvat kuluttajien omaan haluun säästää latauskustannuksissa.

Myös pikalataukseen soveltuvia ulkoisia latureita löytyy markkinoilta. Esimerkiksi ABB Oy on kehittynyt pikalaturin, joka soveltuu tasa- ja vaihtovirralla tapahtuvaan lataukseen. Tasavirtalataukseen löytyy 100 kW:n ja 200 kW:n teholuokat, joten jo alle kymmenen minuutin latauksella energiaa saadaan akustoon huomattavasti. [45] Tämän tyylliset laturit soveltuvat hyvin julkisille latausasemille. Niiden suuren tehon takia tulee kiinnittää huomiota syöttävän verkon ominaisuuksiin.

Ainakin sähköautojen yleistymisen alkuvaiheessa kiinteistöjen automaattiseen mittarinluentaan (Automatic Meter Reading, AMR) perustuvilla sähkömittareilla tulee todennäköisesti olemaan merkitystä latauksen keskitetyssä ohjauksessa. Verkkoyhtiö voi lähettää näihin AMR-mittareihin kytkentäkomentoja, jos lataus halutaan keskeyttää jostain syystä. Mittarista riippuen niissä on yksi tai useampia etäohjattavia releitä. [46] Releisiin voidaan kytkeä kiinteistön eri sähkökuormia, kuten sähköauton lataus tai kiinteistön lämmitys. Latauksen ohjaamisen kannalta ongelmiksi voivat kuitenkin nousta muun muassa ohjattavien releiden vähyys, virran katkaisukyvyyn

riittämättömyys sekä kytkentälaitteiden kulumisen ohjattaessa.

Pikalatauksen korvaajaksi tai kilpailijaksi on ideoitu, että koko auton akuston voisi vaihtaa täyteen ladattuun akunvaihtoasemilla. Asiakas ajaa autonsa vaihtopaikalle, jossa robotiikka vaihtaa tyhjän akuston tilalle täyteen ladatun. Toimitus kestäisi vain joitain minuutteja. [47] Tällä tavalla voitaisiin vähentää myös akkujen aiheuttamaa suurta kustannusta kuluttajalle. Vaihtotekniikka vaatisi kuitenkin autojen tekniikan yhtenäistämistä, jotta akut olisi helppo vaihtaa. [38]

4.2 Latauspaikat

Täyssähköautojen rajoittuneesta toimintasäteestä johtuen ne tarvitsevat hyvän latausinfrastruktuurin toimiakseen joustavasti. Tämä tarkoittaa, että lataamisen tulisi olla mahdollista matkan määränpäässä ja mahdollisesti myös matkan varrella. Toivottavia latauspaikkoja olisivat siis koti sekä parkkialueet ja -talot, jotka sijaitsevat työ-, asiointi-, ostos- tai harrastuspaikan lähellä. Lisäksi erilliset lataus- tai akunvaihtoasemat matkan varrella sekä tienvarsilataus toimisivat mahdollisina latauspaikkoina.

Varsinaisen latausinfrastruktuurin puuttuessa sähköautoilun alkuvaiheessa lataaminen kotona on todennäköisesti kaikkein merkittävin. Lisäksi lataushybridien tapauksessa ei välttämättä ole tarvetta muulle lataukselle. Lataaminen kotona tapahtuu tavallisesta kotitalouspistorasiasta, esilämmittämiseen tarkoitettusta pistorasiasta tai erillisestä kotilatauspisteestä. Etenkin omakotitaloissa edellytykset ovat jo nyt hyvät lataamiseen, mutta esimerkiksi kerrostalojen asukkaille lataamisesta voi muodostua ongelma pistokkeiden määrän ollessa riittämätön tai taloyhtiön ollessa haluton sallimaan sähköautojen lataamisen sen pistokkeista. Edellä mainitut mahdollisuudet ja haasteet koskevat myös pitkälti työpaikkalataamista. Kotia ja työpaikkaa yhdistää myös se, että kummassakin ollaan yleensä yhtäjaksoisesti pitkä aika, jolloin hidas lataus on riittävä täyttämään auton akut.

Pistorasiat eivät kuitenkaan välttämättä ole suoraan hyödynnettävissä lataukseen, jolloin tarvitaan pieniä alkuinvestointeja latauksen mahdollistamiseen. Fortum Oyj on julkaissut suosituksen [48] sähköautojen lataamisesta kiinteistöjen sähköverkoissa. Suosituksen mukaan lämmitystolpat ovat usein mitoitettu kestämään enintään 2 kW kuorman, mikä rajoittaa autojen hitaan latauksen tehokkuutta. Tämän takia syöttävät kaapelit sekä sulakkeet saatetaan joutua vaihtamaan suurempiin, jotta lataustehoa voidaan nostaa. Nykyään lämmitystolpat toteutetaan usein ketjutettuina ryhminä, jolloin sama syöttävä kaapeli on kytketty useampaan lämmitystolppaan. Vaihdeettavana olisi siis mahdollisesti yksittäistä ryhmää syöttävä kaapeli, ryhmiä syöttävä kaapeli sekä näiden lähtöjen sulakkeet. Ryhmittäminen vaikeuttaa myös latauksen ohjaamista. Suosituksen mukaan uusiin kohteisiin latausverkko voitaisiin toteuttaa tähtimäisenä, jolloin jokainen lämmitystolppa olisi ohjattavissa erillisenä.

Potentiaalisimmat paikat julkisille latauspisteille ovat asiointi-, ostos- tai harrastuspaikan lähellä olevat parkkialueet ja -talot. Näissä paikoissa oleskellaan tyypillisesti

enintään muutama tunti, jolloin puolinopea lataus voi olla riittävä täyttämään auton akut. Lisäksi näissä paikoissa on usein parkkiautomaatti, joka voisi toimia myös maksuautomaattina lataussähkölle.

Tulevaisuudessa erilliset lataus- tai akunvaihtoasemat voivat yleistyä ja tehdä sähköautoilusta entistä joustavampaa etenkin pitkillä matkoilla. Latausasemilla käytettäisiin nopeaa latausta, jolloin akkuja saataisiin ladattua merkittävästi jo muutamassa minuutissa. Vaihtoehtoisesti voitaisiin koko auton akusto vaihtaa nopeasti, jolloin pikalatauksen aiheuttamalta tehopiikiltä vältyttäisiin. Akustot voitaisiin ladata pikalatausta pienemmillä tehoilla ja lataus voitaisiin ajoittaa sähköverkon kannalta parempaan aikaan.

Hutri tutki diplomityössään [49] muun muassa mieluisinta latauspaikkaa kuluttajille. Tutkitut vaihtoehdot olivat koti, työpaikka, pikalataus huoltoasemalla ja julkinen lataus esimerkiksi kauppakeskuksessa. Mieluisimmaksi paikaksi osoittautui koti ja toiseksi mieluisimmaksi työpaikka. Julkisen latauksen ja huoltoaseman välillä ei ollut tilastollista eroa. Tutkimukseen vastanneista 58 prosentilla on mahdollisuus ladata autoa kotona ja 29 prosentilla työpaikalla. Lisäksi hieman yli 50 prosenttia vastanneista oli jokseenkin tai täysin samaa mieltä, että 6 – 8 tunnin latausaika olisi riittävän nopea. Nämä tulokset siis puoltavat osaltaan ajatusta, että kotona ja mahdollisesti myös työpaikalla tapahtuva lataaminen olisivat sähköautojen yleistymisen alkuvaiheessa merkittäviä.

4.3 Laskutus- ja maksamismenetelmät

Latausjärjestelmään liittyy oleellisesti latauksesta veloittaminen ja maksaminen. Latausinfrastruktuurin laajetessa maksamisen tulisi olla riittävän helppoa autoilijoille. Perinteisesti sähkölaskuun sisältyy maksu käytetystä energiasta sekä sähkönsiirrosta. Jako on perusteltu, sillä jokaisen sähkönsiirron käyttäminen tulee vain yksi sähköverkko, mutta käytetty energia voi olla periaatteessa tuotettu missä tahansa. Käyttöpaikassa kulutettu energia mitattavaksi ja laskutus tapahtuu sen perusteella. Sähköauto ei kuitenkaan ole sidottu tiettyyn verkon pisteeseen, johon laskukin voitaisiin lähettää. Tarvitaan siis uusia menetelmiä laskutukseen.

Menetelmät voivat vaihdella latauspaikkakohtaisesti. Lehtinen on pohtinut erilaisia vaihtoehtoja diplomityössään [38]. Omakotitalouksissa asuvien laskutus on yksinkertaista, sillä lataamismaksut sisältyvät suoraan normaaliin sähkölaskuun ja latausjärjestelmä on asiakkaan oma. Kerros- ja rivitaloissa asuville tilanne on ongelmallisempi, sillä tavallisesti taloyhtiö vastaa parkkialueesta ja sen käytöstä asukas maksaa vain kuukausimaksua. Tämän takia lataajien sähkönsiirtoa tulisi valvoa ja laskuttaa erikseen käytön mukaan. Sama koskee myös työpaikkoja. Näille latauspaikoille on siis ominaista, että lataaja tunnetaan ennalta. Julkisissa paikoissa ja parkkihalleissa tapahtuvaan lataamiseen tarvitaan erilaiset menetelmät, sillä lataaja voi olla periaatteessa kuka tahansa. Eräs vaihtoehto on, että asiakas maksaa esimerkiksi parkkimaksun yhteydessä latausinfrastruktuurin omistajalle tämän pyytämän

hinnan latauksesta.

Yleisesti laskutukseen ja maksamiseen liittyvät hierarkiat voidaan jakaa esimerkiksi kolmeen vaihtoehtoon. Ensimmäisessä vaihtoehdossa asiakas maksaa lataamisesta suoraan itsenäiselle latausinfrastruktuurin omistajalle pyydetyn hinnan. Latausinfrastruktuurin omistajalla on edelleen sopimukset sähkön jakelijan ja myyjän kanssa. Toisessa vaihtoehdossa asiakkaalla voi olla sopimus energian myyjän kanssa tai myyjä voidaan määrittää erikseen ladattaessa. Latausinfrastruktuurista ja sähkön siirrosta maksetaan erikseen latauspaikkakohtaisesti. Tätä vaihtoehtoa pidetään todennäköisimpänä ratkaisuna. Kolmas vaihtoehto on muuten identtinen, mutta verkkoyhtiö omistaa latausinfrastruktuurin erillisen toimijan sijasta. [50]

4.4 Latauksen ohjaaminen

Teollisuus- ja elinkeinoministeriö sekä Liikenne- ja viestintäministeriö toteavat kumpikin selvityksissään, että sähköautojen lataus aiheuttaisi haasteita sähköverkolle, jos sähköautot yleistyvät ja niitä ladataan ohjaamattomana [3], [7]. Tämä johtuu latauksen tehopiikkien ajoittumisesta todennäköisesti samaan aikaan muiden sähköverkon kuormitushuippujen kanssa, mikä voi johtaa verkon ylikuormittumiseen tai tarpeettoman suureen mitoittamiseen (pieni käyttökerroin). Latauksen ohjausta eli niin sanottua älykästä lataamista onkin tutkittu paljon ja erilaisia menetelmiä ongelman ratkaisemiseksi on esitetty [51], [52]. Tässä työssä esiteltävät ohjausmenetelmät voidaan jakaa muun muassa seuraavasti:

- Latauksen viivästäminen
- Latauksen ajoittaminen jonkin kriteerin mukaan
- Latauksen optimaalinen ohjaus
- Lataustehon skaalaaminen sakkofunktiolla

Latausta voidaan lähteä ohjaamaan autoilijan omasta toimesta eli paikallisesti tai keskitetysti. Paikallisessa ohjauksessa autoilija ohjaisi esimerkiksi ajastamalla omaa lataustaan. Keskitetyssä ohjaamisessa esimerkiksi verkkoyhtiö tai jokin erillinen toimija (aggregaattori) kytkisi latauksia päälle tai pois jonkin kriteerin, kuten kuormituksen liiallisen kasvun tai sähkön hinnan, mukaan [53]. Tällöin siis asiakas tekisi sopimuksen ohjaajan kanssa ja antaisi näin luvan kuorman ohjaamiseen [54]. Yleisesti sähköverkon kuormanohjauksessa korostuu kysynnän hallinta (Demand Side Management, DSM). Sen ideana on saada sähkönkäyttäjät osallistumaan verkon käyttötoimintaan. [55] Käytännössä siis autoilijat antaisivat luvan tai alkaisivat itse ohjata lataustaan esimerkiksi hintakannustimien tai ekologisen valveutumisen ajamana.

Yksinkertaisimmillaan ohjaus perustuu latauksen oikeanlaiseen ajoittamiseen tai viivästämiseen. Tämä menetelmä soveltuu hyvin sekä keskitettyyn että asiakaslähtöiseen ohjaukseen. Menetelmä pyrkii siirtämään latauksen pois huippukuormituksen

hetkestä ja näin tasoittamaan verkon kuormitusta. Esimerkiksi lähteessä [56] vertaillaan ohjaamatonta ja viivästyksellä ohjattua latausta. Latausta ohjataan keskitetysti ja oletetaan, että illalla ladattavien autojen latausta voidaan viivästyä muutamalla tunnilla. Latauksen ajoittamista pois huippukuormitustunneilta on tutkittu lähteessä [57]. Tutkimuksessa on oletettu, että hintakannustimet saavat asiakkaat ajoittamaan lataamista ja että latausjärjestelmä saa hintatiedot kommunikaatiojärjestelmää pitkin. Kummassakin edellä esitetyssä tutkimuksessa älykkäällä latauksella todetaan olevan hyötyä.

Latauksen uudelleen ajastamista voidaan pitää realistisena ohjaustapana teknisessä mielessä jo lähitulevaisuudessa. Teknisesti tämä on toteutettavissa etenkin kotitalouksissa, joihin suurimpaan osaan on vuoden 2013 loppuun mennessä asennettu AMR-mittari [58]. Mittari kykenee ottamaan vastaan ohjauskäskyjä ja siinä on yksi tai useampi ohjausrele, joihin voidaan kytkeä ohjattavat kuormat. Lataukseen käytettävä pistoke voidaan kytkeä releeseen, jota edelleen ulkopuolinen taho tai taloautomaatio voi ohjata. [46] Lisäksi kuluttajia motivoidaan ohjaamaan kulutusta hintakannustimin, kuten sähkön tuntihintaan perustuvilla sähkötuotteilla tai aikatariffeilla. Kuluttaja voi säästää sähkölaskussa välttämällä auton lataamista korkean hinnan aikaan joko ohjaamalla latausta itse tai antamalla erillisen sähkömarkkinoilla toimivan aggregoijan [51] ohjata sitä. Tuntisähkötuotteita on jo nyt saatavilla, kuten esimerkiksi Turku Energian vastaama Markkinasähkö-tuote [59]. Ohjaus voisi perustua myös kuluttajan ja verkkoyhtiön väliseen sopimukseen, jossa verkkoyhtiöllä on lupa kytkeä lataus pois kriittisissä tapauksissa mahdollista korvausta vastaan.

Edellä esitetty ohjausmenetelmä ei tarvitse tietoa pysäköintiajasta, mikä tekee siitä miellyttävän käyttäjän kannalta, mutta mikä toisaalta ei takaa akun latautumista. Kirjallisuudessa on esitetty menetelmiä, joissa latausaika oletetaan tiedetyksi ja latausta optimoidaan tällä aikavälillä. Optimointi voidaan tehdä muun muassa kustannusten tai verkon kuormitushäviöiden perusteella ajastamalla latausta tai säätämällä lataustehoa. Optimoitu lataus edellyttää kuitenkin latausjärjestelmältä usein yksisuuntaista tiedonsiirtoa monimutkaisempaa kommunikaatiota, mikä tekee latausjärjestelmästä hyvin monimutkaisen.

Sähkön hinnan mukaan optimoitaessa optimointiongelma voi olla esimerkiksi muotoa [60]:

$$\min\{EC\} = \min\left\{\sum_{i=t_a}^{t_b} P_i \cdot SP_i\right\}, \quad (1)$$

missä EC on energian hinta, P latausteho, SP sähkön tuntihinta, t_a lataamisen aloitushetki ja t_b lataamisen lopetushetki. i on indeksi, joka kuvaa tässä vuorokauden tuntia. Hintatietona käytetään Nord Poolin eri tuntien spothintoja kyseiselle päivälle (luku 7.4), jolloin tehoa säädetään tunnin tarkkuudella. Optimoinnin reunaehtoina ovat auton akuston kapasiteetti sekä suurin mahdollinen lataus- ja purkausteho. Optimointi tuottaa siis yksittäiselle autolle lataamisen kustannukset minimoivat tunti-kohtaiset tehot. Vastaavasti voidaan minimoida syöttävän verkon tehohäviöitä [61].

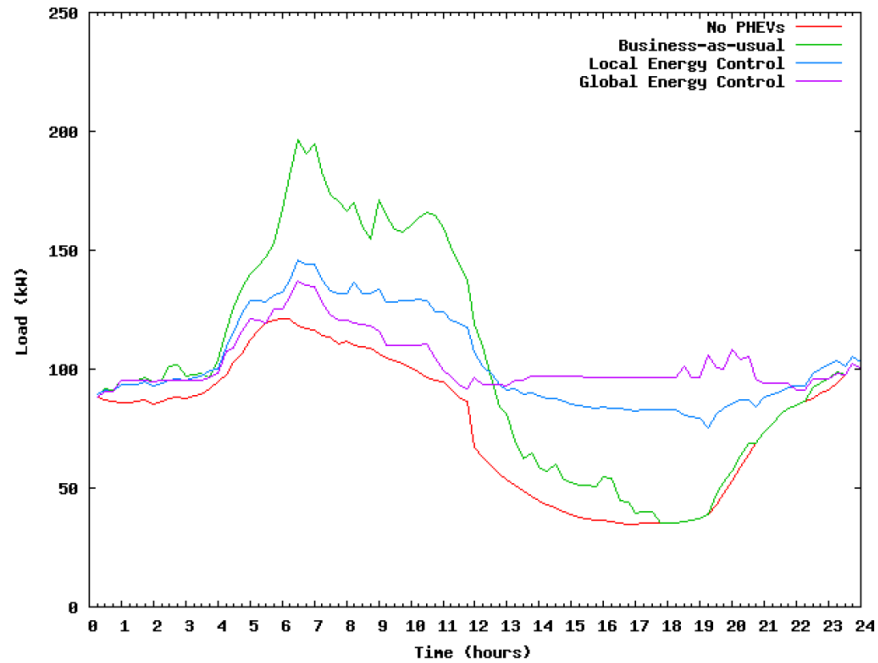
Ongelma on kuitenkin vaativa, sillä syöttävän verkon rakenne ja virrat tulee tuntea. Optimointi tehdäänkin keskitetysti säätämällä yksittäisten autojen latausta.

Ajastetun on-off-ohjauksen ja optimoidun säädön välimuotona voidaan pitää lataustehon rajoittamiseen perustuvia menetelmiä, joissa tehoa rajoitetaan esimerkiksi sähkön hintaan tai verkon kuormitukseen perustuvan sakkofunktion avulla. Tämä menetelmä vaatii lataustehon portaattonta säätömahdollisuutta, mutta ei välttämättä tarvitse kaksisuuntaista kommunikaatiojärjestelmää, vaan latausjärjestelmälle kerrotaan suoraan latausteho. Kyseistä menetelmää on tutkittu lähteessä [62]. Verzijlbergh et al. [63] tutkivat hieman vastaavaa, mutta he pyrkivät varmistamaan akkujen latautuminen täyteen huomioimalla käytettävissä olevan latausajan. Käytännössä tämä kuitenkin monimutkaistaa järjestelmää huomattavasti.

Edellä esitetyt menetelmät pyrkivät siis pohjimmiltaan parantamaan verkon käyttöeroa eli siirtämään latausta verkon suuren kuormituksen hetkeltä pienen peruskuorman hetkille. Mets et al. [64] hyödynsivät tätä lähtökohtaa suoraan säätämällä lataustehoa portaattomasti niin, että lataustehon ja peruskuorman muodostama kokonaiskuorma on tasainen läpi vuorokauden. Menetelmää on tutkittu paikallisessa ja keskitetyssä ohjaamisessa. Kummassakin tapauksessa tarvitaan erillinen latausjärjestelmä latauspaikalle, ja keskitetyssä tarvitaan lisäksi viestiyhteydet latauksia koordinoivaan tahoon. Keskitetysti ohjatun latauksen alkaessa latausjärjestelmä pyytää autolle koordinoijalta latausohjeet, jotka perustuvat koordinoijan tekemään peruskuormaennusteeseen kyseiselle päivälle sekä aikaisemmin jaettuihin latausohjeisiin. Verkon kokonaiskuorman tasoittumista ohjauksen tuloksena on havainnollistettu seuraavan sivun kuvassa 8.

Lähteen [64] menetelmää on käytetty hyödyksi portaattonta tehonsäätöä ja on-off-latausta vertailtaessa, kun ohjaus on keskitetty ja myös on-off-lataus on optimoitu [65]. Vertailun tulosten mukaan portaattomuudella ei saavuteta erityistä hyötyä on-off-lataukseen verrattuna huipputehon rajoittamisessa. Sitä vastoin portaattomuudella saavutetaan tasaisempi kokonaiskuorma, joskaan ero ei ole suuri. Ero kuitenkin kasvaa, jos on-off-latauksessa latauksen pienintä päälläoloaikaa kasvatetaan. Perustapauksena tutkimuksessa on käytetty viiden minuutin aika-askelta eli tunnin tarkkuudella erot voivat olla jo suuret.

Kylmillä keleillä latauksen ohjaaminen pois päältä voi olla ongelmallista akun lämpimänä pidon kannalta. Kuten luvussa 3.3 todettiin, akku täytyy pitää riittävän lämpimänä, jotta se voidaan ladata. Tällöin latauksen liiallinen pätkiminen tekee siitä tehottomaa, jos tauon jälkeen akustoa joudutaan ensin lämmittämään. Tämä lisää myös latauksessa kuluvaa energiaa ja laskee sähköauton hyötysuhdetta verkosta renkaisiin. Lisäksi tilannetta voi vaikeuttaa kotilatauksen muutenkin jo alhainen teho sekä mahdollisesti käytettävät sisätilan lämmittimet.



Kuva 8: Esimerkki ohjauksen vaikutuksesta verkon kuormitukseen. Punainen: verkon kuormitus ilman latausta, vihreä: verkon kokonaiskuorma 30 %:n PHEV-penetraatiolla, sininen: kokonaiskuorma paikallisella ohjauksella ja violetti: kokonaiskuorma keskitetyllä ohjauksella. [64]

5 Lataamisen vaikutus sähköverkkoon

Latauksen verkkovaikutuksia arvioitaessa on tutkittava verkon eri osia, sillä vaikutukset eri jänniteportaissa ja toisaalta verkon eri osissa voivat erota huomattavastikin toisistaan. Kantaverkon ja energiajärjestelmän riittävyyden kannalta sähköautojen määrän huomattavankaan kasvun ei pitäisi tuottaa ongelmia, jos vain älykkästä lataamisesta huolehditaan. Esimerkiksi 140 000 autoa vuonna 2020 kuluttaisivat sähköä 0,63 % vuoden 2010 sähkön kokonaiskulutuksesta ja niiden latauksen keskiteho olisi 63 MW ja samanaikaisen latauksen teho noin 500 MW, jos käytettäisiin hidasta 3,6 kW:n latausta [3]. Vuonna 2010 sähkön kulutuksen keskiteho oli noin 9700 MW [66]. Jos latausta ohjataan eli se ajoitettaisiin verkon kannalta hyvin, vaikutukset olisivat pienet. Keski- ja pienjänniteverkossa vaikutukset voivat kuitenkin olla merkittäviä jo pienillä sähköautojen määrillä ilman ohjausta. Latauksella on vaikutusta niin sähkön laatuun kuin verkon kuormittumiseen.

5.1 Verkkovaikutukset

5.1.1 Vaikutus sähkön laatuun

Sähkön laadusta puhuttaessa voidaan esiintyvät ilmiöt jakaa yksittäisiin tapahtumiin, kuten keskeytyksiin, jännitekuoppiin ja hetkellisiin ylijännitteisiin, sekä jatkuviin ilmiöihin, kuten jännitteen ja taajuuden vaihteluihin, välkyntään, jännite-epäsymmetriaan sekä harmonisiin yliaaltoihin. Osa näistä ilmiöistä voi johtua sähkön käyttäjän toiminnasta ja osa taas syöttävästä verkosta tai sähkön tuotannosta. [67] Sähköautojen lataus vaikuttaa lähinnä käyttäjäpuolelta sähkön laatuun, jolloin ne voivat aiheuttaa esimerkiksi harmonisia yliaaltoja, välkyntää sekä jännite-epäsymmetriaa. Toisaalta verkosta ladattavien sähköautojen suuri paikallinen määrä ja pikalataus voivat aiheuttaa verkon jännitetason vaihteluita. Sähkön laatuun liittyviä latauksen vaikutuksia on haastava arvioida, sillä niihin tulevat vaikuttamaan muun muassa valmistajien teknologiaratkaisut, autojen sijoittuminen verkkoon sekä käytettävät latausmenetelmät. Tässä käsiteltävät latauksen vaikutukset laatuun ovat:

- Jännitteen ja virran säröytyminen
- Jännite-epäsymmetria
- Jännitetason hitaat vaihtelut
- Jännitetason nopeat vaihtelut (välkyntä)

Perustilanteessa Suomessa verkon jännite ja virta ovat 50 Hz:n taajuudella värähtelevää siniaaltoa. Harmonisilla yliaalloilla tarkoitetaan verkkojännitteen tai -virran verkkotaajuuden kokonaisluvullisia monikertoja, jotka summautuvat verkon perusaaltoon. Lisäksi verkossa voi esiintyä aliharmonisia, joiden taajuus on alle verkkotaajuuden, tai epäharmonisia, joiden taajuus ei ole perusaallon kokonaisluvullinen

monikerta. [67] Tyypillinen tapa arvioida jännitteen tai virran yliaaltosisältöä on kokonaissärökerroin (Total Harmonic Distortion, THD), jonka jakelujännitteen laatua käyttäjän liittämiskohdassa käsittelevä standardi SFS-EN 50160 [68] määrittelee jännitteelle seuraavasti:

$$\text{THD} = \sqrt{\sum_{i=2}^{40} (U_i)^2}, \quad (2)$$

missä indeksi i on yliaallon järjestysluku ja U on jänniteyliaallon amplitudin suhde jännitteen perusaaltoon. Virran kokonaissärökerroin voidaan laskea vastaavalla tavalla. Standardi SFS-EN 50160 kiinnittää huomiota lähinnä jänniteyliaaltoihin, joiden kymmenen minuutin tehollisille keskiarvoille annetaan rajat. Lisäksi laitteen kokonaissärökertoimen tulee olla pienempi tai yhtä suuri kuin 8 %. [68] Latauksessa harmonisia tuottavat joko auton oma tai ulkoinen laturi. Ne näkyvät verkkoon päin virtaan harmonisia tuottavina signaaligeneraattoreina. Edelleen verkon impedansseissa nämä harmoniset virrat säröyttävät verkon jännitettä.

Harmonisista aiheutuvat merkittävimmät haitat ovat häiriöt ja lisähäviöt verkossa sekä verkon nollajohtimen kuormittuminen. Harmoniset häiritsevät muita verkon laitteita suoraan sähköön laadun heikkenemisen kautta tai lähettämällä korkeataajuisia säteilyä ympäristöön. Tämä säteily voi häiritä esimerkiksi herkkiä elektronikkalaitteita tai tietoliikennettä. Muuntajissa ja kaapeleissa harmoniset tuottavat lisähäviöitä, mikä lämmittää komponentteja ja voi näin lyhentää niiden elinikää. Nollajohdinta kuormittavat järjestysluvultaan kolmella jaolliset yliaallot, jotka eivät kolmivaihejärjestelmässä kumoudu, vaan ne summautuvat nollajohtimeen. Tämä voi muodostua ongelmaksi etenkin vanhoissa kiinteistöissä, joissa nollajohdinta ei ole mitoitettu kestävänsä suurehkoja virtoja. Harmonisia tuottavien kuormien lisääntyminen voikin nousta ongelmaksi tulevaisuudessa, minkä takia suodatuksen ja raja-arvojen määrittämiseen tulee kiinnittää huomiota. [69]

Jännite-epäsymmetrialla tarkoitetaan kolmivaihejärjestelmässä eri vaihejännitteiden välistä eroa tehollisarvoissa tai vaihe-eroissa. Epäsymmetriaa mitataan vastakomponentin osuutena myötäkomponentista [68]. Standardin SFS-EN 50160 mukaan 95 % vastakomponentin tehollisarvon kymmenen minuutin keskiarvoista tulee olla välillä 0 – 2 % myötäkomponentista. Jännite-epäsymmetriaa aiheutuu esimerkiksi epätasaisesti vaiheiden välille jaetuista kuormista. Kuten jo todettua, sähköautoja tullaan todennäköisesti lataamaan merkittävästi hitaalla yksivaiheisella latauksella. Eri kiinteistöissä lataukseen käytettävät pistokkeet voivat olla kytkettyjä samaan vaiheeseen, jolloin jokin vaiheista kuormittuu enemmän. Toisaalta taas satunnaisen kytkennän seurauksena kuormituserot vaiheiden välillä voivat tasoittua. Epäsymmetrisuus voi esimerkiksi vaikeuttaa kolmivaiheisesti verkkoon kytkettyjen laitteiden toimintaa ja aiheuttaa lisähäviöitä.

Jännitetason vaihtelulla tarkoitetaan jännitteen tehollisarvon muutosta esimerkiksi kuormituksen muutoksen seurauksena [68]. Sähköautoa ladattaessa laturin otta-

ma virta aiheuttaa jännitteenalenemaa eri verkkokomponenttien yli. Verkkoa suunniteltaessa jännitteenalenemiin kiinnitetään erityishuomiota. Standardissa SFS-EN 50160 on annettu rajat jakeluverkon jännitetason vaihtelulle. Perustilanteessa jännitteen tehollisarvon vaiheen ja maan välillä tulisi olla 230 V, jolle sallitaan 10 % vaihtelu ylös- tai alaspäin. Standardissa sallitaan samansuuruinen vaihtelu myös keskijänniteverkossa. Liiallinen jännitteen aleneminen aiheuttaa muun muassa kuormitusvirtojen kasvua, valaistuksen himmenemistä ja mahdollisesti toimintahäiriöitä herkissä laitteissa.

Jännitetason nopeat vaihtelut voidaan kokea valaistuksen kirkkauden hetkellisinä vaihteluina. Tätä ilmiötä kutsutaan välkyntäksi. Välkyntä on siis subjektiivinen kokemus, mutta sen voimakkuus riippuu jännitevaihteluiden suuruudesta, vaihtelun taajuudesta ja toistuvuudesta sekä valaisinteknologiasta. Välkyntälle voidaan laskea häiritsevyysindeksi edellä mainittujen tekijöiden pohjalta. [67] Häiritsevyysindeksiä on jaettu pitkäaikaista ja lyhytaikaista välkyntää kuvaaviin indekseihin. Standardissa SFS-EN 50160 on annettu rajat pitkäaikaiselle häiritsevyysindeksille.

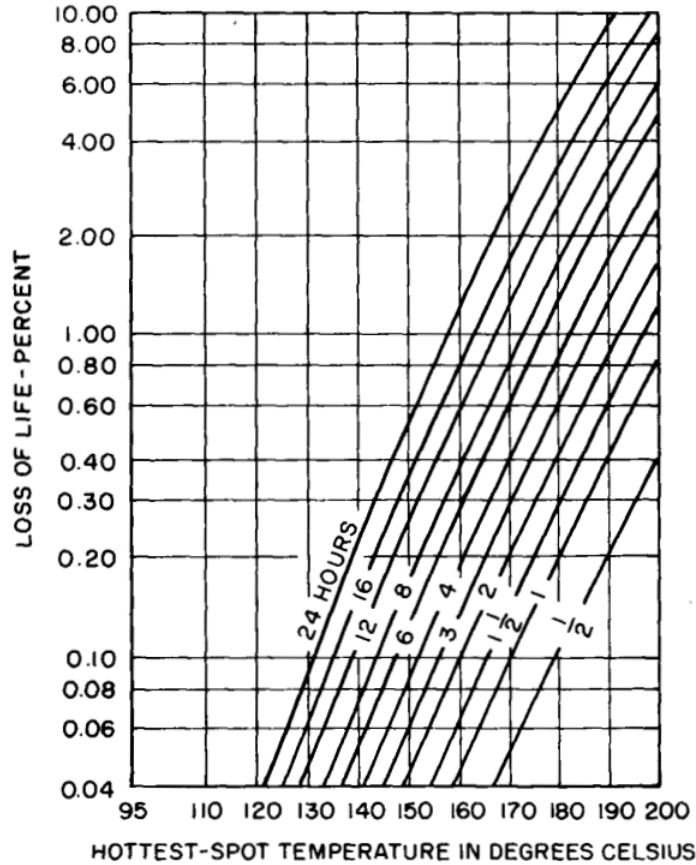
5.1.2 Verkon kuormituksen kasvun vaikutus

Verkon kuormana sähköauton lataus on luonteeltaan haastava. Latausteho on suuri suhteessa sitä syöttävän verkon lähimpänä olevan osan maksimitehoon. Toisin sanoen lataus pyritään suorittamaan mahdollisimman suurella syöttävän verkon ja auton sallimalla teholla, jotta latausaika saataisiin lyhenemään. Lisäksi lataus ajoittuu usein samaan aikaan suuren peruskuorman kanssa, ja latausenergian tarve riippuu ympäristön lämpötilasta, kuten monella muullakin verkon kuormalla. Nämä tekijät yhdessä lataustarpeen lisääntymisen epävarmuuden kanssa luovat haasteita verkon suunnittelulle alueilla, joissa sähköautojen latauksen oletetaan lisääntyvän.

Verkkoa suunniteltaessa verkkokomponentit pyritään valitsemaan ja koko järjestelmä toteuttamaan niin, että investointikustannukset ja elinkaaren aikana syntyvät kustannukset minimoituvat kulutusennusteet, tekniset reunaehdot sekä sähkön laatu huomioiden. Suunnittelun tuloksena komponenttien tulisi selvittää suunnittelujaksolle ennustetuista kuormista eli jännitteenalenemat, termiset kuormat ja häviöt tulisi pysyä halutuissa rajoissa. Liian suuri kuormittaminen lyhentää kaapeleiden ja muuntajien elinikää eristeiden huonontuessa, mikä voi johtaa ennenaikaisiin verkostoinvestointeihin. Lisäksi liika kumentuminen sisäasennuksissa voi aiheuttaa tulipalovaaran. Häviöt taas lisäävät verkon elinkaaren aikaisia kustannuksia. [70]

Tärkeä yksittäinen verkon kuormituksen vaikutus kohdistuu jakelumuuntajiin. Muuntajien tulee kestää verkossa tietty elinikä, jos niiden kuormitus pysyy sallituissa rajoissa ja ylikuormittaminen on vain lyhytaikaista. Sallitun ylikuorman määrittäminen on kuitenkin tapauskohtaista, sillä se riippuu muun muassa ulkolämpötilasta sekä ylikuorman kestosta, suuruudesta ja toistuvuudesta. Voimakkaan kuormituksen aikana muuntajan käämitykset voivat kuumeta yli mitoitettujen rajojen ja näin vaurioittaa ympäröiviä eristyksiä. IEEE:n öljyeristeisille muuntajille antamassa kuormitusohjeessa [71] on kuvattu muuntajan eristeiden eliniän lyhenemistä käämityksen

kuumimman pisteen ja ylikuormituksen keston funktiona (kuva 9).



Kuva 9: Muuntajan eristysten eliniän lyheneminen käämityksen kuumimman pisteen ja ylikuorman keston funktiona. [71]

Eliniän lyheneminen (Loss of Life) on määritelty kaavalla

$$\% \text{Loss of Life} = \frac{F_{\text{EQA}} \cdot t \cdot 100}{\text{Normal insulation life}}, \quad (3)$$

missä F_{EQA} on vanhenemista kuvaava kerroin ja t tutkittava ajanjakso tunteina. F_{EQA} riippuu edelleen käämityksen kuumimman pisteen lämpötilasta. Kuvan tapauksessa kuumimman pisteen referenssilämpötila on 110°C , jolla siis normaali elinikä on määritetty. [71] Sähköautojen latauksessa ylikuormat ovat todennäköisesti melko lyhytkestoisia, mutta kuvasta 9 nähdään, että jo lyhytkestoiset ylikuormat voivat vanhentaa muuntajaa.

5.2 Vaikutukset keskijänniteverkossa

Tikka on tutkinut diplomityössään [72] sähköauton puolinopean (10 kW) lataamisen vaikutusta keskijänniteverkkoon. Tutkittava verkko sijoittuu Etelä-Suomeen, sisältää kolme sähköasemaa sekä vaihtelevasti kuormittuneita johtolähtöjä. Verkon

saneeraustarvetta on arvioitu sähköautojen eri penetraatioasteilla (25 %, 50 % ja 100 %) ohjaamattomalla latauksella. Saneeraustarvetta esiintyy ensin lähdoilla, jotka ovat jo ennestään voimakkaasti kuormitettuja. Tarve aiheutuu lähinnä jakelumuuntajien ylikuormittumisesta, mutta penetraation kasvaessa myös jännitteenalenemat kasvavat merkitseviksi, jolloin varsinaiseen keskijänniteverkkoon tulee saneeraustarvetta. Häviökustannusten todetaan kasvavan huomattavasti, sillä latauskuorman huippu summautuu peruskuorman huippuun ja häviöt riippuvat kuormasta neliöllisesti. Latauskuorman lisääntymisen arvellaan olevan merkityksetöntä vielä lähivuosina.

Vastaavanlaisia tuloksia on saatu myös lähteessä [73], jossa on tutkittu verkostokustannusten ja häviöiden kasvua sähköautojen eri penetraatioasteilla (35 %, 51 % ja 62 %). Tutkittavat verkot ovat tiheään asutulta kaupunkialueelta sekä tätä harvemmin asutulta alueelta. Tutkimuksessa todetaan kustannusten kasvun olevan harvaanasuttua aluetta suurempaa kaupunkialueella, jossa kasvu voi olla noin viidenneksen verrattuna tilanteeseen ilman sähköautoja. Keskijänniteverkon osuus kustannuksista on kuitenkin pieni. Lisäksi tutkimuksessa todetaan, että ajastamalla suurin osa latauksesta pienen kulutuksen hetkille, 60 – 70 % kasvaneista investoinneista voidaan välttää. Jälleen tulee kuitenkin huomata, että vaikutuksia on tutkittu hyvin suurille sähköautojen penetraatioasteella, eikä tämän takia suuria vaikutuksia keskijänniteverkkoon ole todennäköisesti odotettavissa lähivuosina.

5.3 Vaikutukset pienjänniteverkossa

5.3.1 Verkon kuormituksen kasvun vaikutus

Tikka tutki diplomityössään sähköauton puolinopean latauksen vaikutusta myös pienjänniteverkkoon samoilla sähköautojen penetraatioasteilla kuin keskijänniteverkkoon. Tutkitussa pienjänniteverkossa saneeraustarpeet ovat suuria, sillä johtimia ja jakelumuuntajia joudutaan vaihtamaan suurempiin ylikuorman tai liian suuren jännitteenaleneman takia. Vaihtoehto komponenttien uusimiselle on jakaa verkko pienempiin osiin, jolloin joudutaan investoimaan uuteen verkkoon. Jälleen saneeraustarve riippuu huomattavasti verkon aikaisemmasta kuormasta. Tulokset ovat samansuuntaisia taajamaverkossa ja haja-asutusalueen verkossa. Haja-asutusalueella verkko saattaa kuitenkin selvitä vähäisillä verkkovaikutuksilla, kun sähköautojen penetraatio on pientä. Saneerauskustannukset voivat kuitenkin nousta haja-asutusalueella taajamaverkkoa suuremmaksi, jos saneeraustarvetta syntyy.

Latauksen aiheuttamaa jakelumuuntajien vanhenemista on tutkittu kirjallisuudessa paljon. Vanheneminen johtuu muuntajan voimakkaan kuormittamisen aiheuttamista kuumista pisteistä muuntajan eristyksistä, mikä edelleen huonontaa eristyksen tasoa. Esimerkiksi lähteissä [74] ja [75] on tutkittu jakelumuuntajien vanhenemista. Tutkitut muuntajat ovat 15 kVA ja 25 kVA, joiden elinikää usean auton samanlainen lataaminen voi tulosten mukaan lyhentää huomattavasti.

Pillai ja Bak-Jensen [76] tutkivat muun muassa sähköautojen latauksen vaikutusta jakelumuuntajan käyttökerrotimeen. Käyttökerroin määritellään kuorman keskitehon ja huipputehon suhteena eli se kuvaa kuormituksen tasaisuutta. Tutkittu muuntaja on nimellisteholtaan 250 kVA ja se syöttää asuinalueita, jonka vuorokauden huippukuorma on kello 17. Tulosten mukaan ohjaamaton lataaminen parantaa käyttökerrointa sähköautojen määrän kasvaessa. Muuntajasta lataa enintään 30 autoa, joiden lataustehot ovat 2 kW, 5 kW ja 10 kW. Käyttökertoimen paraneminen johtuu sähköautojen latauskuorman ajoittumisesta iltatunneille muuntajan peruskuorman huipun jälkeen.

5.3.2 Vaikutus sähköön laatuun

Lähteessä [77] on tutkittu latauksen aiheuttamaa jännite-epäsymmetriaa pienjänniteverkossa. Tutkimuksessa yksivaiheisesti ladattavia autoja on sijoitettu joko pienjännitelähdön alkuun tai loppuun ja latausvirta voi olla joko 10 A, 15 A tai 20 A. Kaikki autot ladataan samasta vaiheesta, joka on ennestään vähän tai voimakkaasti kuormitettu. Lataaminen johdon loppupäässä näyttää tulosten mukaan vaikuttavan enemmän jännite-epäsymmetriaan kuin lataaminen johdon alkupäässä. Jos vaiheen kuorma on ennestään pieni, latauksen vaikutus on positiivinen eli vaiheiden väliset erot pienenevät. Ilmiö on suurempi johdon loppupäässä. Jos taas kuorma on ennestään suuri, jännite-epäsymmetria voi kasvaa etenkin johdon loppupäässä. Ainakaan tutkituissa tapauksissa jännite-epäsymmetria ei ole erityisen suurta. Lisäksi todellisuudessa eri autojen lataus jakautuu eri vaiheille tai on kolmivaiheista, mikä muuttaa tilannetta oleellisesti.

Latauksen aiheuttamia harmonisia on hyvä tutkia mittauksin, sillä saatavilla ei välttämättä ole mitään varmaa tietoa käytetyn laturin sisäisestä rakenteesta. Wenge et al. [78] mittasivat erään kaupallisen sähköauton hidasta yksivaihelatausta (3 kW) ja kokeellisen sähköauton kolmivaihelatausta (11 kW). Kaupallinen auto käyttää litium-akustoa. Kaupallisen auton latauksessa jännitteen kokonaissärökerroin oli koko latauksen ajan noin 4,5 % ja toisellakin sähköautolla kertoimen sanotaan käyttäytyvän vastaavalla tavalla. Yksivaihelatauksen jännitettä tarkkailtiin koko latauksen ajan ja siinä huomattiin vaihteluita. Vaikka, jännitteen taso ei muutu yli standardien rajojen, kyseinen vaihtelu voi aiheuttaa välkyntää. Tulee huomata, että jännitteen kokonaissärökertoimeen vaikuttaa myös syöttävän verkon rakenne, joten tulos ei ole yleistettävissä.

Lähteessä [79] on nostettu esille järjestysluvultaan kolmannen yliaallon esiintymisen latauksen aikana. Mittauksissa kyseisen yliaallon osuus virran tehollisarvosta oli noin 11,6 %. Mittaukset tehtiin markkinoilla olevalle Nissan Leaf -täyssähköautolle. Mittauksissa akusto ladattiin täyteen, kun varausta oli aluksi noin puolet jäljellä. Lataus tapahtui suurimman osan latausajasta tehollisarvoltaan 225 voltin vakiojännitteellä ja tehollisarvoltaan 16,4 ampeerin vakiovirralla. Jännitteen kokonaissärökerroin oli noin 3 %. Samassa tutkimuksessa mitattiin myös Mitsubishi i-MiEV:n lataamista tasavirralla ulkoisella pikalaturilla. Pikalatauksessa akustoon ladattiin 4,3

kWh 13 minuutissa lataustehon ollessa 40 kW:n ja 13 kW:n välillä. Tutkimuksessa todetaan, että pikalatauksella voi olla vaikutusta etenkin heikoissa pienjänniteverkoissa, sillä virran säröisyys vaihtelee ja on huomatta latauksen aikana. Latauksen alussa kyseinen laturi ottaa noin 2,5-kertaisen virran kahdesta vaiheesta. Laturia syötettiin erään huoltoaseman pienjänniteverkosta, jolla on oma liityntäpiste keskijänniteverkkoon.

Edellisen perusteella yhden auton lataamisella voidaan todeta olevan jo pieniä vaikutuksia etenkin paikallisesti laturin toiminnan seurauksena, mutta toisaalta häiriöt vaikuttavat pysyvän sallituissa rajoissa. Vaikutukset voivat olla kiusallisia, kuten välkyntä, ja haitallisia, kuten verkostokomponenteissa syntyvät lisähäviöt. Vaikka kaikki lataamisen vaikutukset sähkön laatuun eivät kasva suoraan sähköautojen penetraation mukana, on mahdollista, että laadun kanssa tullaan kohtaamaan vaikeuksia tulevaisuudessa.

6 Liikennetutkimus

Sähköautoista halutaan osaltaan korvauksia nykyisille polttomoottoriautoille. Niistä pyritään tekemään ainakin toistaiseksi käyttöominaisuuksiltaan ja ulkonäöltään perinteisten autojen kaltaisia. Akkuteknologian ollessa vielä kehittymätöntä lataushybridit tarjoavat polttomoottoriautoille kilpailukykyisiä sähköautovaihtoehtoja, jotka vastaavat suorituskyvyiltään pitkälti perinteisiä autoja. Toisaalta täyssähköautojen kantamaa pyritään parantamaan, mutta kantaman ollessa rajoittunut niitä markkinoidaan hieman eri perustein kuin monia polttomoottoriautoja, kuten esimerkiksi kaupunkiautoiksi. Ainakin toistaiseksi näyttää siis siltä, että sähköautot halutaan maanteille ja kaupunkeihin polttomoottoriautojen tilalle. Näin ollen ne voidaan tietysti varauksin rinnastaa liikennekäyttäytymiseltään perinteisiin autoihin, jolloin sähköautojen tutkimisessa voidaan hyödyntää jo olemassa olevaa tieliikennedataa. Toisaalta on jo nähtävissä piirteitä, että liikenteen sähköistäminen tulee muuttamaan nykyistä autokulttuuria tai tarjoamaan kokonaan uusia liikkumismuotoja.

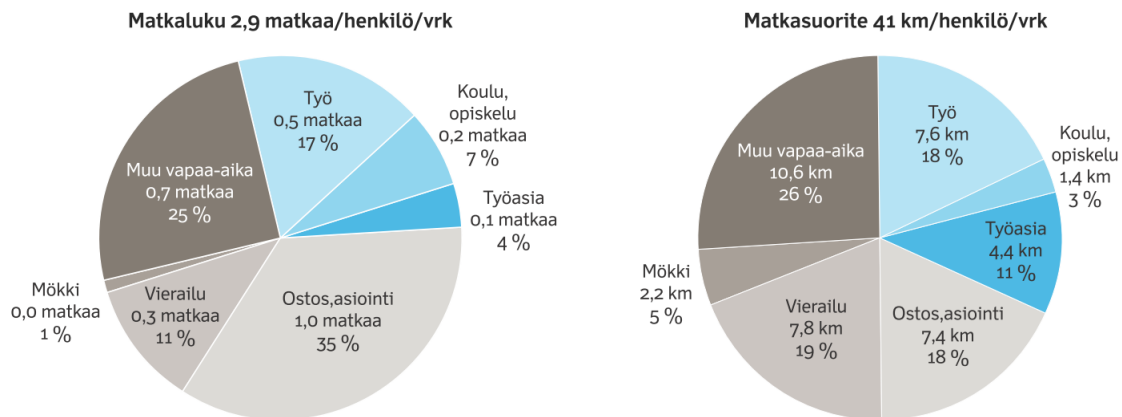
6.1 Valtakunnallinen henkilöliikennetutkimus

Liikennevirasto on tutkinut Suomessa ihmisten liikkumista jo 70-luvulta lähtien valtakunnallisissa henkilöliikennetutkimuksissa. Maaliskuussa 2012 ilmestyi viimeisin tutkimus, jossa kartoitettiin ihmisten liikkumista vuosina 2010 – 2011. Tutkimus suoritettiin kolmivaiheisena ja ympärivuotisena kyselytutkimuksena, johon osallistui noin 20 000 ihmistä eri puolilta Suomea. [5]

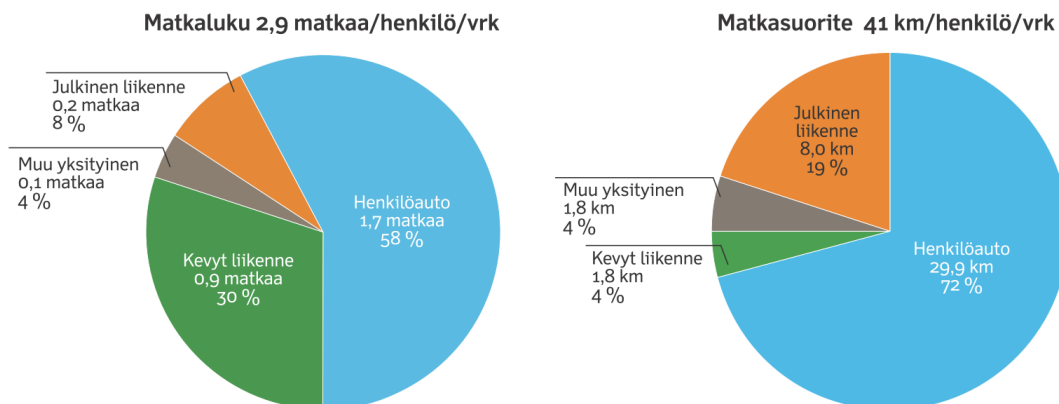
Osallistujilta kysyttiin tutkimuksen ensimmäisessä osiossa taustatietoja heidän liikkumistarpeidensa ja -mahdollisuuksiensa kartoittamiseksi. Toisessa osiossa keskityttiin varsinaiseen liikkumiseen tutkimuspäivänä. Osallistujilta kysyttiin tutkimuspäivän matkat, niiden kellonajat, matkojen tarkoitukset, matkakohteet, käytetyt kulkutavat sekä mahdollisuus vaihtoehtoisen kulkutavan käyttöön. Kolmannessa osiossa keskityttiin pitkiin yli sadan kilometrin matkoihin. Tämän työn kannalta mielenkiintoisimpia ovat alle sadan kilometrin matkat, joiden analysointiin seuraavassa keskitytään.

Kyselyn pohjalta saatiin kuva vuorokauden eri matkakohteista ja näiden matkojen määrästä sekä matkojen pituuksista. Tulokset on esitetty kuvassa 10. Keskimäärin ihmiset tekevät vuorokaudessa siis noin kolme matkaa, joista suurin osa on ostos- tai asiointimatkoja, muita vapaa-ajanmatkoja (esimerkiksi harrastukset) sekä työmatkoja.

Yksi henkilö liikkuu vuorokaudessa keskimäärin 41 km, joista kuvan 11 mukaan noin 70 % taitetaan henkilöautolla. Tämä luku sisältää henkilöauton kuljettajana ja matkustajana suoritettut matkat. Pelkästään kuljettajana ajetaan noin 50 % eli noin 20 km päivän kaikista matkasuoritteista. Matkaluvusta henkilöauton kuljettajana suoritetaan noin 1,25 matkaa vuorokaudessa. Henkilöautolla on siis varsin merkittävä osuus ihmisten päivittäisessä liikkumisessa.



Kuva 10: Eri matkan tarkoitusten osuudet henkilön kotimaan matkaluvusta ja -suoritteesta. [5]

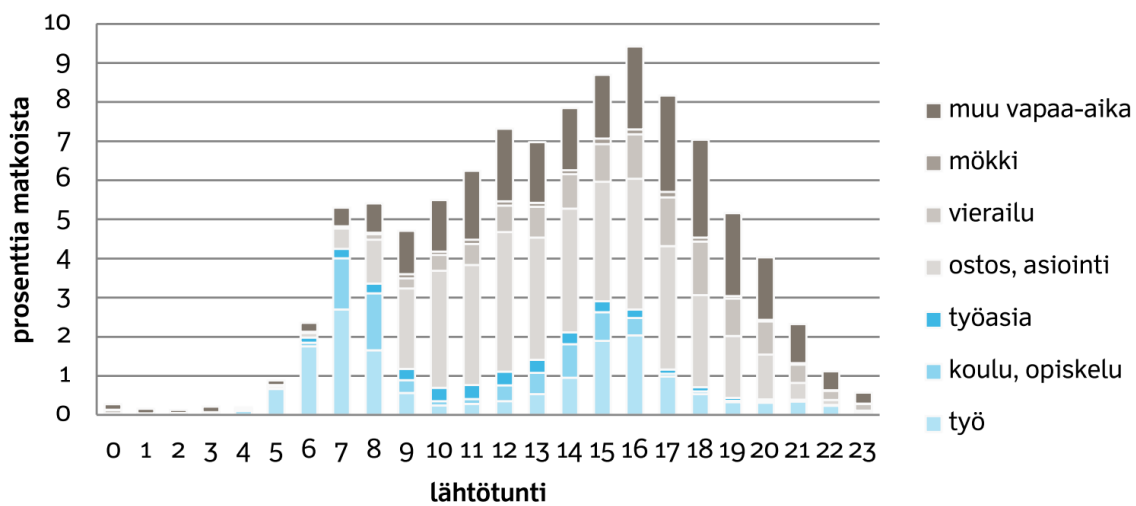


Kuva 11: Eri pääasiallisten kulkutapojen osuudet henkilön kotimaan matkaluvusta ja -suoritteesta. [5]

Henkilöautolla ajettujen matkojen lukumäärän sekä pituuden lisäksi on kiinnostavaa, mikä on henkilöauton osuus eri kohteisiin suuntautuvista matkoista ja mikä on näiden matkojen alkamisajankohta. Henkilöauton kuljettajana toimittua osuutta päivän matkasuoritteista eri kohteisiin suuntautuvista matkoista on havainnollistettu taulukossa 5. Nähdään, että henkilöautolla ajetaan merkittävät osuudet työ-, ostos- ja asiointimatkasuoritteista sekä kaikista vapaa-ajan matkasuoritteista. Myös työasioista huomattava osuus ajetaan henkilöautolla. Ajallista vaihtelua on havainnollistettu kuvassa 12. Nähdään, että työmatkat ajoittuvat pääasiassa aamuun kello seitsemän ja iltapäivään kello kuudentoista ympärille. Työasiointi tapahtuu näiden aikojen välillä. Kaikki muut henkilöautolle merkittävät matka ovat ajoittuneet melko tasaisesti aamun ja alkuillan väliin. Tutkimuksessa on myös esitetty henkilöautolla ajettujen matkojen lähdön aikajakauma. Jakauma on melko tasainen aamun ja illan välillä, mutta piikit on havaittavissa aamun ja iltapäivän työmatkojen ajankohtana.

Taulukko 5: Henkilöauton ja muiden kulkutapojen osuudet prosentteina päivän matkasuoritteista matkan tarkoituksen mukaan. Muut kulkutavat sisältävät muun muassa jalankulkijana, polkupyöräilijänä sekä henkilöauton, linja-auton ja junan matkustajana toimitut matkat.

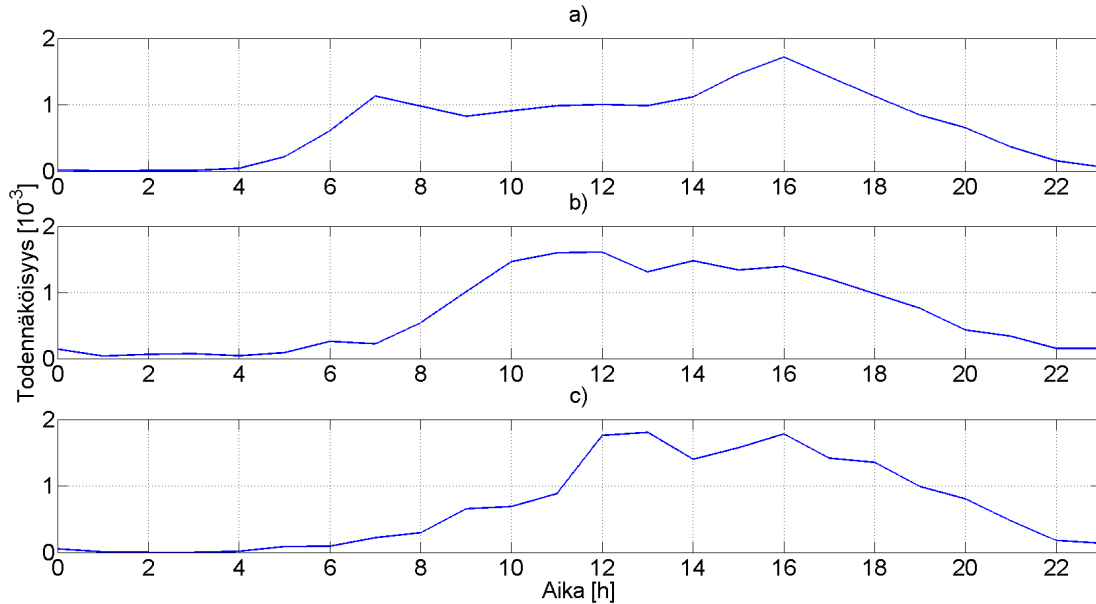
	työ	koulu, opiskelu	työasia	ostos, asiointi	vierailu	mökki	muu vapaa-aika	kaikki
Henkilöauton kuljettaja	69	20	37	65	48	53	34	49
Muut	31	80	63	35	52	47	66	51
Yhteensä	100	100	100	100	100	100	100	100



Kuva 12: Vuokauden matkojen alkamisaikojen tuntijakauma matkan tarkoituksen mukaan luokiteltuna. [5]

Tulee kuitenkin huomioda, että kuvassa 12 on mukana niin arkena kuin viikonloppuna tapahtuvat matkat. Tutkimuksessa on kuitenkin erikseen tutkittu eri kohteisiin suuntautuvien matkojen viikonpäivävaihtelua. Työmatkat ja työasiat ajoittuvat pääasiassa arkipäiville, ostos- ja asiointimatkat arkipäiville ja lauantaille. Vierailut ja muut vapaa-ajan matkat painottuvat hieman enemmän viikonloppulle. Vuorokauden matkaluku henkilöä kohden on kuitenkin lauantaina 1,05 ja sunnuntaina 0,79, eli viikonloppuna matkoja ajetaan arkea vähemmän. Matkojen pituuksissa ei kuitenkaan ole juuri eroja.

Koska tässä työssä ollaan kiinnostuneita myös henkilöautolla ajettujen matkojen ajallisesta vaihtelusta arkena, lauantaina ja sunnuntaina, tutkimuksen pohjalta tehtiin lisäanalyseja vaihtelun selvittämiseksi. Kuvan 12 tiedoista deaggregoitiin kaikki henkilöauton kuljettajana toimitut matkat, joista muodostettiin omat tuntikäyrät henkilöauton kuljettajana toimittujen matkojen alkamisajankohdille arkipäiville, lauantaille ja sunnuntaille. Kyseiset käyrät on esitetty kuvassa 13. Kuvat on annettu myöhemmin muodostettavassa mallissa käytettävässä muodossa.

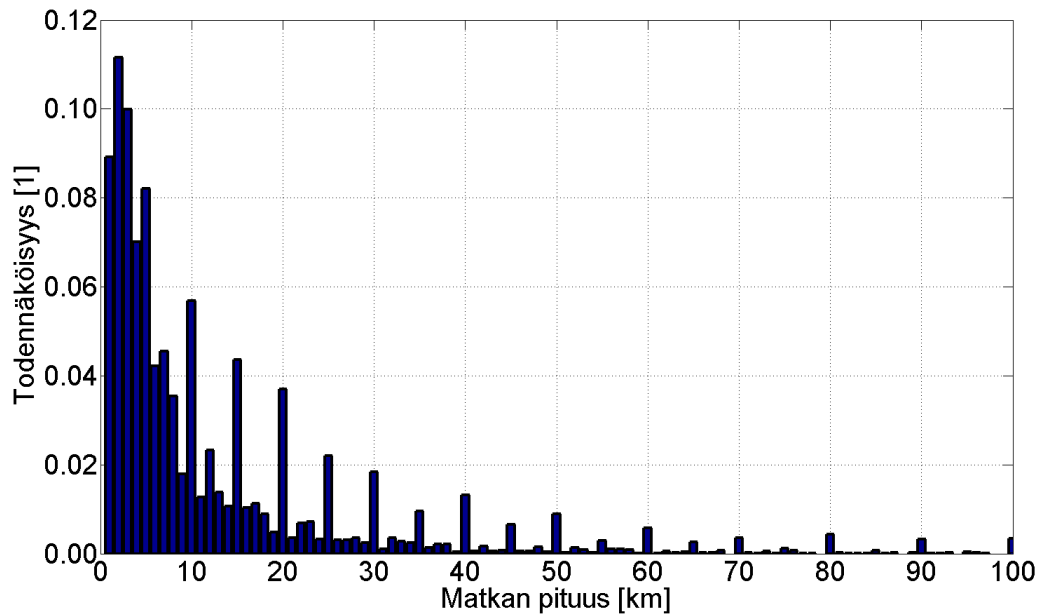


Kuva 13: Henkilöauton kuljettajana toimittujen matkojen alkamisajankohtien todennäköisyysjakauma. a) arki, b) lauantai ja c) sunnuntai.

Henkilöautolla ajamiseen liittyy myös pientä vuodenaikavaihtelua. Henkilöliikennetutkimuksen mukaan matkan keskipituus on kesällä hieman keskimääräistä pitempi ja talvikuukausina taas hieman lyhyempi. Vuorokauden matkaluku on taas tutkimuksen mukaan hieman suurempi syksyllä ja keväällä. Vaihtelut ovat kuitenkin matkan keskipituudella ja matkaluvulle melko pieniä. Merkittävimmin korostuu heinäkuun matkan keskipituus. Henkilöliikennetutkimuksen perusteella tämä poikkeavuus saattaa johtua keskimääräistä pidemmistä mökkeily- ja vierailumatkoista sekä vapaa-ajan matkoista. Matkan tarkoituksillakin on siis vaihteluita vuodenaikojen välillä.

Henkilöliikennetutkimus sisältää myös henkilöautolla ajettujen matkojen pituusjakauman, joka on esitetty kuvassa 14. Kuvan muodostamisessa käytetty aineisto on räätälöity tätä tutkimusta varten. Alkuperäisessä muodossaan luokkavälit ovat suuremmat, mutta nyt pituudet on ilmoitettu yhden kilometrin tarkkuudella. Kuvan matkoissa henkilöauto on ollut pääkulkutapa eli matkat sisältävät siirtymiset autolle. Nähdään, että suurin osa ajetuista matkoista on pituudeltaan kymmenen kilometriä tai vähemmän. Matkapituusjakauma on todella keskeinen latauksen mallintamisessa, jotta ladattavat energiat ovat todenmukaisia.

Edellä esitettyihin tietoihin liittyy kuitenkin ongelma, sillä ne kuvaavat henkilöiden liikennekäyttäytymistä, vaikka tässä tutkimuksessa ollaan kiinnostuneita yhteen autoon liittyvistä tiedoista. Esimerkiksi aikaisemmin todettiin, että keskimäärin henkilöautolla ajetaan päivässä noin 20 km, jolloin vuoden ajosuorite on vajaa 8000 km. Henkilöliikennetutkimuksesta käy kuitenkin ilmi, että yhden henkilöauton vuotuinen matkasuorite on noin 17000 km, jolloin päiväkohtainen suorite on noin 50 km. Pienempään lukuun ei siis huomioidu, että kotitaloudessa useat ihmiset käyttävät



Kuva 14: Histogrammi matkojen pituuksista henkilöautolla ajon ollessa pääkulku-tapana. Ensimmäisen luokan keskus on 1 km ja viimeisen 100 km tarkkuuden ollessa 1 km.

samaa autoa. Autokohtainen vuorokauden matkaluku on siis suurempi kuin henki-lön. Henkilöliikennetutkimuksen mukaan yksittäisen henkilöautolla ajettun matkan keskipituus on 16,7 km, jolloin henkilöauton vuorokauden matkaluku olisi noin kol-me.

6.2 Sähköautojen tuomat muutokset autoiluun

Kaikki edellä esitetyt tilastot pohjautuvat sähköautojen puuttuessa luonnollisesti polttomoottoriautoilla ajettuihin matkoihin. Näiden tietojen käyttäminen sähköau-totutkimuksessa on hieman kyseenalaista, sillä kukaan ei vielä tiedä, miten liikku-miskäyttäytyminen tulee muuttumaan sähköautojen myötä. Sähkön ollessa käyttö-voimana on odotettavissa, että pitkillä matkoilla henkilöautojen osuus tulee vähe-nemään, jos sähköenergiaa riittää vain noin 150 kilometrin matkoihin. Toisaalta alle 100 kilometrin vuorokausimatkoissa kantaman ei pitäisi olla mikään este.

Hutri tutki diplomityössään [49] täyssähköautoihin liittyviä odotuksia. Tulosten mu-kaan ihmiset haluavat sähköautoilta samansuuntaisia ominaisuuksia kuin perintei-siltä autoilta. Tärkeimpinä pidettiin edullisia käyttökustannuksia. Vastaajat haluai-sivat kantamaksi yli 150 kilometriä, mutta kahden auton kotitalouksissa tämäkin kantama nähtiin riittäväksi. Tulos puoltaa osaltaan ajatusta, että ainakin aluksi täyssähköautoilla tullaan ajamaan vain päivittäisiä lyhyitä ajoja, kun taas tule-vaaisuudessa niistä odotetaan polttomoottoriautojen korvaajia. Ajokäyttäytymistä ei

haluta siis ainakaan tietoisesti muuttaa.

Tulevaisuudessa mahdollisia muutoksia autoiluun voi saada aikaan julkisen liikenteen kehittyminen. Etenkin kaupungeissa sähköautot tulevat todennäköisesti kilpailemaan kehittyneen julkisen liikenteen kanssa. Tämä tulisi todennäköisesti vähentämään henkilöautojen ajosuoritteita ja sähköenergian kulutusta henkilöä kohden. Muutoksia voi aiheuttaa myös muun muassa sähköautojen heikko toiminta kylmässä. Tämä saattaisi vähentää sähköautojen suoritteita kylminä vuodenaikoina ja siirtää niitä joukkoliikenteelle. On siis vaikeaa ennustaa, miten sähköautoilu tulee muuttamaan autoilutottumuksia, vai muuttako se ollenkaan. Tämä on sähköautotutkimuksen eräs melko fundamentaalinen ongelma.

täjätyypin tietyn tunnin normeerattu keskiteho on saatu laskemalla keskiarvo niiden mitatuista ja normeeratuista tuntien energioista. Vastaavalla tavalla saadaan hajonnat. Laskentakaavat on esitetty yhtälössä 6 [80].

$$\begin{cases} L_c(m(t), d(t), h(t)) = E \left\{ \frac{W_{h,c}(m(t), d(t), h(t))}{W_{a,c}} \right\} \\ s_c(m(t), d(t), h(t)) = s \left\{ \frac{W_{h,c}(m(t), d(t), h(t))}{W_{a,c}} \right\} \end{cases}, \quad (6)$$

missä L_c on estimaatti käyttäjätyypin normeeratulle tuntien energialle mittauksien pohjalta, $m(t)$, $d(t)$ ja $h(t)$ ovat mittaukseen liittyvät kuukausi-, päivä- ja tunti tiedot, $W_{h,c}$ on käyttäjän tuntien energia ja $W_{a,c}$ on käyttäjän vuosien energia. Yhtälöparin alemmassa yhtälössä s_c on estimaatti käyttäjätyypin normeeratulle tuntien energian hajonnalle mittauksien pohjalta. $E\{\}$ sekä $s\{\}$ ovat estimointioperaattoreita normeeratulle tuntien energialle ja sen hajonnalle. Tässä tuntien energia ja tuntien keskiteho ovat sama asia.

Sähkönkäyttäjien tietyn tunnin tuntien keskitehot oletetaan tyypillisesti normaalijakautuneiksi tyyppikuormituskäyrästä saadun tunnin keskiarvon ympärille. Tällöin kaavalla 4 saatu käyttäjän tuntien keskiteho määrittää jakauman keskikohdan ja kaavalla 5 saatu hajonta kuvaa yksittäisten sähkönkäyttäjien tuntien keskitehojen jakautumista keskikohdan ympärille. Tällainen menettely mahdollistaa muun muassa yksittäisen käyttäjän huipputehon tutkimisen. Keskitehon ja hajonnan perusteella huipputehoa voidaan arvioida kaavalla:

$$P_{\max}(t) = \mu_P(t) + z \cdot \sigma_P(t), \quad (7)$$

missä P_{\max} on valittua luottamustasoa vastaava huipputeho ja z kyseistä luottamustasoa vastaava luottamuskerroin. Kaavan avulla voidaan siis arvioida jokaisen vuoden tunnin huipputehoa, jota ei ylitetä luottamustason määräämällä todennäköisyydellä. Kaava määrittää siis keskiteholle varmuusmarginaalin, joka peittää alleen todellisen tehon valitulla todennäköisyydellä. [81] Voidaan ajatella, että esimerkiksi 99 %:n luottamustasolla tutkittavista riippumattomista tapauksista yhdessä sadasta todellinen teho ylittää lasketun huipputehon. Tapaus voi tarkoittaa esimerkiksi tietyn muuntajan tiettyä vuoden tuntia, jolloin sadan vuoden aikana yhtenä vuonna kyseisen tunnin keskiteho ylittää huipputehon.

Todellisuudessa yksittäisen käyttäjän tuntien keskiteho ei todennäköisesti kuitenkaan noudata mitään tavanomaista todennäköisyysjakaumaa, mutta yksittäisiä käyttäjiä summattaessa tuntien keskitehon käyttäytyminen alkaa muistuttaa normaalijakaumaa. Tämä on seurausta keskeisestä raja-arvolauseesta. [82] Toisaalta yksittäisen käyttäjän tuntien keskitehon on havaittu noudattavan enemmän lognormaalijakaumaa kuin normaalijakaumaa [80].

Summattaessa eri käyttäjien kuormituksia yhteen keskiarvot voidaan summata kaavalla [83]:

$$E\left(\sum_{i=1}^N X_i\right) = \sum_{i=1}^N E(X_i), \quad (8)$$

missä X on satunnaisluku (esimerkiksi tuntikeskiteho), $E()$ on odotusarvo ja N summattavien satunnaislukujen määrä. Hajontojen summaamisessa täytyy huomioida, ovatko käyttäjien kuormitukset korreloituneita eli riippuvatko ne toisistaan. Riippumattomille muuttujille hajontojen summa voidaan laskea varianssien avulla kaavasta [83]:

$$Var\left(\sum_{i=1}^N X_i\right) = \sum_{i=1}^N Var(X_i), \quad (9)$$

missä $Var()$ on varianssi. Jos kuormat eivät ole riippumattomia, hajonta voidaan laskea esimerkiksi kaavan 11 avulla. Kyseinen kaava on johdettu yleisestä satunnaismuuttujien varianssien summan lausekkeesta [83]

$$Var\left(\sum_{i=1}^N X_i\right) = \sum_{i=1}^N Var(X_i) + \sum_{i=1}^N \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N Cov(X_i, X_j), \quad (10)$$

missä $Cov()$ on kovarianssi.

Eri käyttäjätyyppien välistä ja sisäistä korrelaatiota on siis syytä tutkia. Tämä tarkoittaa tuntikeskitehojen korreloinnin tutkimista eri käyttäjien välillä jokaisella vuorokauden tunnilla. Korrelaatiota on tutkittu esimerkiksi [82]:ssa. On selvää, että tietyn tyypin vuorokauden ja vuoden sisäiset tehot ovat voimakkaasti korreloituneita (kuuluvat samaan ryhmään), mutta tilanne ei ole yhtä selvä tunnin sisäisten tehojen kohdalla. Korreloituneiden sähkökäyttäjien tuntikeskitehojen välillä voi siis olla lineaarinen riippuvuus eli yhden käyttäjän tehon muuttuessa muuttuu toisenkin. Käytännössä tällainen tilanne voisi olla esimerkiksi samalla alueella sijaitsevilla käyttäjillä tuulisena päivänä. Korreloiminen vaikuttaa tutkittavan tunnin varianssiin ja siis myös hajontaan. Korrelaation vaikutus voidaan ilmaista kaavalla [82]

$$\sigma^2 = \sum_{i=1}^k n_i \bar{\sigma}_i^2 + \sum_{i=1}^k n_i (n_i - 1) \bar{\sigma}_i^2 \bar{\rho}_{ii} + \sum_{i=1}^k n_i \bar{\sigma}_i \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^k n_j \bar{\sigma}_j \bar{\rho}_{ij}, \quad (11)$$

missä σ^2 on tutkittavien sähkökäyttäjien tuntikeskitehojen varianssi, $\bar{\sigma}_i^2$ on keskimääräinen tuntikeskitehon varianssi tyypin sisällä, n_i ja n_j ovat tyyppeihin kuuluvien käyttäjien määrät, $\bar{\rho}_{ii}$ on keskimääräinen korrelaatio kahden kuorman tuntikeskitehojen välillä tutkittavan tyypin sisällä ja $\bar{\rho}_{ij}$ kahden tyypin välillä. $\bar{\sigma}_i$ ja $\bar{\sigma}_j$ ovat

tyyppien tuntikeskitehojen keskimääräiset keskihajonnat. Samassa tutkimuksessa huomattiin korrelaatiota käyttäjätyypin sisällä sekä toisiaan muistuttavien tyyppien välillä. Korrelaatio on sitä pienempi, mitä erilaisempia tutkitut ryhmät ovat.

7.2 Sähköautoon liittyvä tyypikuormituskäyrä

Muodostettavan simulointimallin tarkoituksena on tuottaa sähköautolle oma vuorokauden tyypikuormituskäyrä. Sähköauton tapauksessa eri tyypit täytyy myös määrittellä, sillä onhan erilailla käyttäytyviä sähköautoja yhtä paljon kuin niiden käyttäjiäkin, kuten tavallisten sähköverkon kuormien kanssa. Vaikka sähköauton paikka muuttuu vuorokauden aikana, sen kuormituskäyrä sidotaan johonkin verkon pisteeseen. Sähköverkon kannalta kiinnostavinta on vain auton latauspaikka, johon tyypikuormituskäyrä muodostetaan. Tulee kuitenkin huomata, että yksi auto voi ladata päivän aikana useassa eri paikassa, jolloin jokaiselle paikalle tarvitaan omat kuormituskäyränsä. Näin ollen voidaan ajatella sähköauton päivän matkojen rakenteen ja latauspaikkojen määrittävän osaltaan tietyn käyttäjätyypin. Eräs tyyppi on siis esimerkiksi päivän aikana pelkästään töissä käyvät autot, jotka ladataan kotona.

Toinen tyyppiä määrittävä tekijä on itse auto. Latauksessa otettava energia, ja siis osaltaan myös tyypikäyrän muoto, riippuu auton kokonaiskulutuksesta, latauksen hyötysuhteesta ja akuston kapasiteetista. Pienikulutuksiset sähköautot lataavat keskimäärin muita nopeammin akuston täyteen, ja toisaalta paljon päivän aikana energiaa käyttävän auton lataus jatkuu pitkälle yöhön kotona ladattaessa. Kuormituskäyrän muoto riippuu siis osaltaan auton energiankäytöstä. SLY-mallissa kuorman kokoinformaatio huomioidaan kertomalla indeksejä kohteen vuosienergialla. Nyt kuitenkin tietyn tyypin vuosienergia on vaikea tai lähes mahdoton määrittää, sillä ei ole mitään perusteita, miten tietyn tyypin arkikäyttäytymiseen liitetään viikonlopun käyttäytyminen tai vuodenaikojen mukana mahdollisesti muuttuva käyttäytyminen (lomat, ajo talvella). Lisäksi autojen kulutuksen vaihtelusta lämpötilan, ja siis vuodenaikojen mukana, ei ole tietoa. Tämän takia tutkitaan vain päiväkohtaisia tehokäyriä tietyille tyypille.

Kolmas tyyppiä määrittävä tekijä on lataus. Aikaisemmin esiteltyjen lataustapojen perusteella on oletettavaa, että eri latauspaikoissa tullaan käyttämään eri lataustehoja. Suuri latausteho tekee kuormituskäyrästä huipukkaan ja pieni laakean. Toisaalta latauksia tullaan todennäköisesti ohjaamaan tulevaisuudessa, millä on myös voimakas vaikutus kuormituskäyrän muotoon. Nykyään on vielä vaikea ennustaa, millaiset ohjausmenetelmät tulevat yleistymään ja kuinka laajalti, mutta niiden tuomien etujen takia ohjausmenetelmiä on perusteltua tutkia. Tässä työssä tutkitaan kahda tapaa: viivästettyä ohjausta ja hintaperusteita ohjausta. Edellinen tapa vastaa periaatteessa nykyistä aikatariffia eli lataus ajoitetaan yö sähkölle. Jälkimmäisessä tavassa lataus keskeytetään, jos sähkönhinta nousee määritetyn rajahinnan yli. Vastaavasti voidaan ajatella, että se ajoittuu halvoille tunneille.

Edellä esitettyjen tekijöiden perusteella voidaan muodostaa lukuisia käyttäjätyyp-

pejä. Näistä toisaalta jo muutama riittää esimerkiksi verkostosimuloinneissa kuvaamaan sähköautoihin liittyviä käyttäjätyyppejä. Tämä johtuu mallintamisen epävarmasta luonteesta ja käytännön teknologiaratkaisuista. Työssä toteutettavassa mallissa erilaisia tyyppiejä voi muodostaa yhdistelemällä muun muassa seuraavia tekijöitä ja niihin liittyviä parametreja:

- Päivän rakenne
 - Koti – työ – koti
 - Koti – työ – työasiointi – työ – koti
 - Koti – työ – vapaa-aika – koti
 - Koti – työ – koti – vapaa-aika – koti
 - Koti – vapaa-aika – koti
- Auto
 - Akuston kapasiteetti
 - Auton kulutus
- Lataus
 - Latauspaikka (koti, työ, julkinen)
 - Latausteho
 - Latauksen hyötysuhde
 - Ohjaustapa (ei ohjausta, viivästys, hintaohjaus)

Nämä ovat eräitä tekijöitä, joihin on päädytty työn teoriaosion perusteella. Työn teorian pohjalta voidaan muodostaa myös eri kombinaatioista todennäköisimpiä tyyppikuormituskäyriä.

Liikennetutkimuksen lähtöaikajakaumissa arkea ja viikonloppua ei ole erotettu kovin selkeästi, jolloin erillisten arkea, aattoja ja pyhäitä kuvaavien kuormituskäyrien muodostus vaikeutuu. Jako voidaan kuitenkin toteuttaa tätä työtä varten henkilöliikennetutkimuksesta teetetyn lisäanalyysin pohjalta. Lisäksi viikonloppuna päivärakenteeksi on oletettu ainoastaan kaksi tai useampia vapaa-ajanmatkoja. Esimerkiksi aattona käydään aamupäivästä asioilla ja illasta vapaa-ajan ajossa. Pyhänä käydään vain kerran vierailulla. Näin saadaan arjen ja viikonloppuun välille vaihtelua. Vuodenaikavaihteluita ei ole huomioitu päivärakenteissa tai matkasuoritteissa, sillä henkilöliikennetutkimuksen perusteella suuria vaihteluita ei ole. Lisäksi vaihteluiden vaikutukset ovat todennäköisesti pienet verrattuna auton kulutuksen ja akuston lämmittämisen vaatiman energian vaikutuksiin. Jos siis kuormituskäyrä halutaan muodostaa kylmälle vuorokaudelle, kasvatetaan vain auton kulutusta ja huononnetaan latauksen hyötysuhdetta jonkin arvion mukaan.

Aikaisemmin todettiin, että autolle kertyy keskimäärin noin kolme matkaa vuorokaudessa ja että henkilöautolla tehdään huomattava osuus erilaisista matkoista. Tämän perusteella päivärakenteet, joissa on noin kolme ja joissa käydään useassa paikassa minimimäärällä matkoja, ovat todennäköisiä. Lisäksi latauspaikat vaikuttavat tutkittaviin päivärakenteisiin, sillä niitä on suunniteltu kodin lisäksi työpaikoille ja julkisiin kohteisiin, joten näihin paikkoihin halutaan muodostaa oma tyyppikäyränsä.

7.3 Mallissa käytetty lähtödata

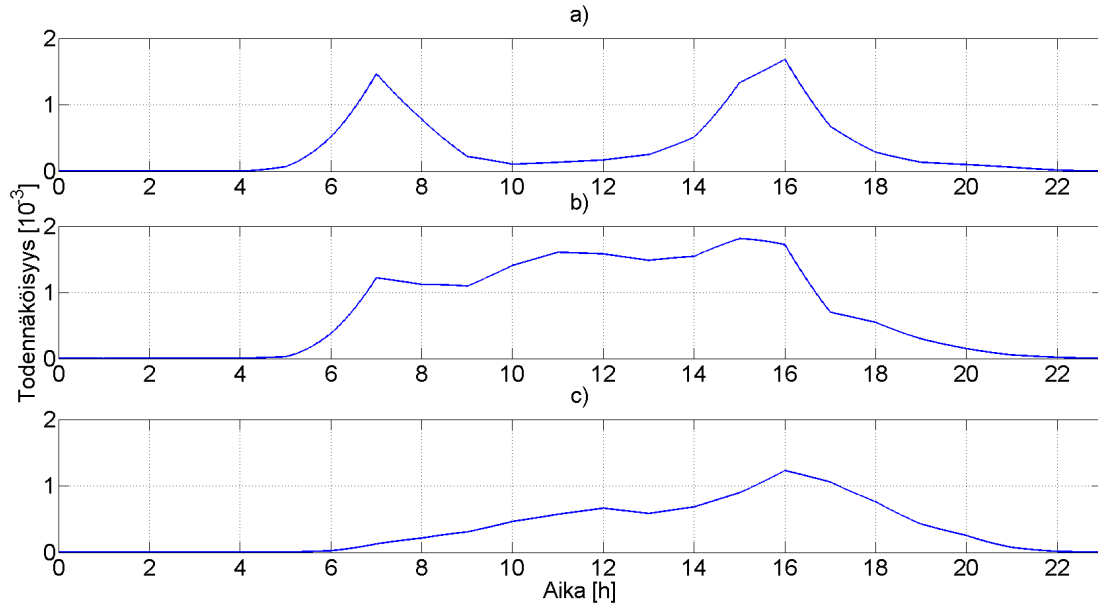
Tässä luvussa käydään läpi mallin käyttämiä lähtötietoja. Luvussa esitetyt arvot on valittu perusarvoiksi työssä esitetyn teorian perusteella. Näitä arvoja käytetään muuntajien kuormitusta tutkittaessa luvussa 8. Simulointimallin toimintaa tutkittaessa eri parametreja varioidaan perusarvojen läheisyydessä.

Toteutettava malli pohjautuu pitkälti Valtakunnalliseen henkilöliikennetutkimukseen. Keskeisessä osassa ovat eri matkojen lähtöaikojen jakaumat, koska mallin tarkoituksena on tuottaa lataustehon käyrä ajan funktiona. Nämä jakaumat painotetaan vielä kyseisen päivän (arki, aatto, pyhä) henkilöautolla ajettavien matkojen aikajakaumalla (kuva 13). Yksinkertaisuuden vuoksi kaikkia työajan ulkopuolella tapahtuvia ajoja kuvataan vain yhdellä jakaumalla, joka on ostos- ja asiointijakauman, vierailujakauman ja muiden vapaa-ajan matkojen jakauman keskiarvo. Jos jakaumat syötettäisiin erillään, erilaisten päivärakenteiden määrä kasvaisi huomattavasti, eikä jakaumien samankaltaisuuden takia saataisi juuri lisäinformaatiota. Malli ottaa siis aikajakaumista syötteekseen vain työmatkoja, työasiointimatkoja, vapaa-ajan matkoja ja henkilöautolla ajettavia matkoja kuvaavat jakaumat. Kyseiset jakaumat henkilöautolla ajettavia matkoja lukuun ottamatta on esitetty mallissa käytettävässä todennäköisyysmuodossa kuvassa 15.

Lisäksi malli ottaa syötteekseen henkilöliikennetutkimukseen perustuvan matkanpituusjakauman (kuva 14). Matkanpituusjakauma on oleellinen, jotta energiankulutus voidaan mallintaa. Koska yli 100 kilometrin matkoja ei ole huomioitu, mallin antamat keskimääräiset matkasuoritteet ovat henkilöliikennetutkimuksessa saatuja pienempiä.

Henkilöliikennetutkimuksen perusteella saadaan myös määritettyä auton keskinopeus, joka tarvitaan matka-aikojen laskemiseen. Tutkimuksen mukaan henkilöauton vuorokauden matkasuorite (kuljettajana ja matkustajana) on noin 30 km ja siihen käytetty aika noin 34 minuuttia. Näin ollen keskinopeus olisi noin 50 kilometriä tunnissa. Kaupunkiliikennettä ajatellen luku tuntuu suurelta, mutta sen arvo ei ole kovin oleellinen lopputuloksen kannalta, koska SLY-muotoisten latauskäyrien tarkkuus on yksi tunti.

Malliin on syötettävä lähtötiedot myös sähköautosta sekä lataustavasta. Näihin liittyviä lähtötietoja ovat auton akkukapasiteetti, keskikulutus, latausteho ja latauksen hyötysuhde. Kaksi edellistä saadaan tutkimalla kaupallisten autojen tietoja. Voi-



Kuva 15: Matkojen lähtöaikojen todennäköisyysjakaumat. a) työmatkat, b) työasiamatkat ja c) vapaa-ajan matkat.

daan laskea esimerkiksi keskiarvoja useiden eri mallien pohjalta, jolloin tyyppikäyriä ei tarvitse muodostaa kuin yhden tyyppiselle autolle. Käytettävät lataustehot voidaan arvioida luvussa 4.1 esitetyn perusteella. Latauksen hyötysuhteena käytetään arvoa 0,9, joka tulee pääasiassa laturin hyötysuhteesta.

Akuston kapasiteetti on laskettu keskiarvona taulukon 3 täyssähköautojen kapasiteeteista. Kulutus on valittu niin, että auton kantamaksi tulee 150 km, jolloin kulutus on 0,14 kWh/km. Tämä vastaa kulutusta lämpimällä säällä. Kylmän sään tapauksessa on arvioitu, että kantama laskee noin kolmanneksen lämpimän sään kantamasta. Kylmän sään kulutusta käytetään tässä työssä kulutuksen perusarvona. Saatu kapasiteetti ja kulutus ovat:

- Akuston kapasiteetti 21 kWh
- Kulutus 0,20 kWh/km

Mallissa latausteho voidaan valita vapaasti. Tehokertoimen arvoksi on oletettu yksi. Nyt tutkittavat tehot ovat:

- 1-vaiheinen lataus: 3,7 kW (230 V, 16 A)
- 3-vaiheinen lataus: 11 kW (400 V, 16 A)

Muita malliin määritettäviä parametreja ovat päivärakenne, latauspaikat, latauksen ohjaustapa sekä hintaohjaukseen liittyen rajahinta. Päivärakenteita ja latauspaikkoja on käsitelty luvussa 7.2. Ohjaustapojen mallintamista käsitellään tarkemmin luvussa 7.4.

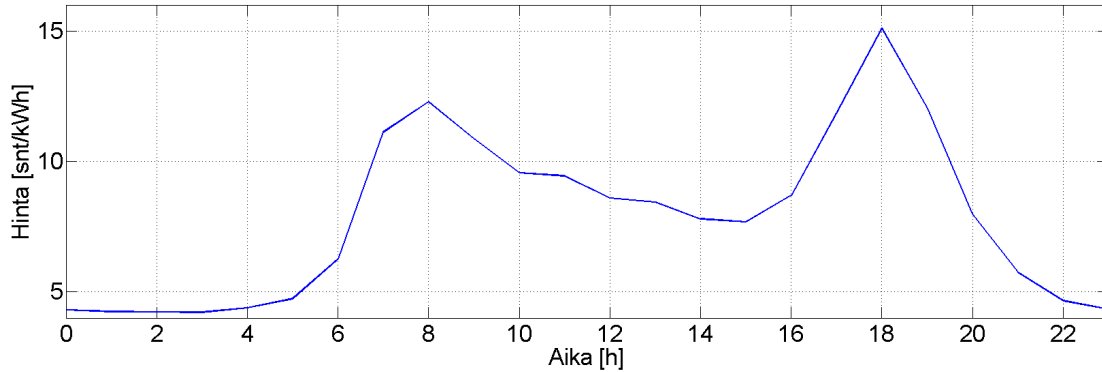
7.4 Tutkittavat ohjausmenetelmät

Tässä työssä tutkittavat ohjausmenetelmät ovat latauksen viivästäminen sekä ohjaaminen sähkön tuntihinnan mukaan. Kummassakin menetelmässä ohjaaminen tapahtuu vain kotona, kun sinne on saavuttu viimeisen kerran tutkittavan vuorokauden aikana. Viivästämisessä lataus ajoitetaan alkamaan illalla tiettyyn aikaan. Käytännössä autoilija voi itse asettaa latureihin ajastuksen tai verkkoyhtiö voi ohjata latauksen päälle. Tässä työssä viivästetyt lataukset aloitetaan kello ilta yhdeksän ja yhdentoista välillä tasatunnein. Jos siis autoilija saapuu ennen ilta yhdeksää, sen latauksen aloitusajankohdaksi arvotaan satunnaisesti joko kello 21, 22 tai 23. Jos auto saapuu kotiin tämän aloitusajankohdan jälkeen, lataus voidaan aloittaa heti. Käytännössä satunnaistus pyrkii mallintamaan joko verkkoyhtiön toteuttamaa yösähkön porrastusta tai autoilijoiden satunnaisesti valitsemaa aloitusajankohtaa. Voidaan kuitenkin olettaa, että lataus ajoitetaan alkamaan lähellä yösähkötariffin voimaantuloa. Akkua ladataan niin kauan, kunnes se on täynnä.

Ohjaaminen sähkön hinnan mukaan tarkoittaa latauksen ajastamista pois korkean hinnan tunneilta tai ajastamista matalan hinnan tunneille. Kuten aiemmin teoriaosiossa on todettu, tämä menetelmä perustuu autoilijan haluun säästää sähkölaskussa sopimalla esimerkiksi verkkoyhtiön tai erillisen aggregoijan kanssa, mikä on sähkönhinnan rajahinta latauksen poiskytkennälle. Tässä työssä käytetään sähkön tuntihintatietona Nord Poolin ilmoittamaa Suomen aluehintaa käyttötarkoitukseen erikseen valittuna vuorokautena. Tarkoituksena on antaa esimerkki, kuinka ohjaus voisi käytännössä toimia.

Todellisuudessa asiakkaille tarjottavat tuntihintaiset sähkösopimukset tulevat todennäköisesti perustumaan Nord Poolin sähköpörssihintoihin. Nord Pool on Pohjoismaissa toimiva sähköpörssi, jonka spotmarkkinoiden kautta ostetaan noin 70 % Pohjoismaissa kulutetusta sähköstä. Spotmarkkinoiden tuntihinta muodostuu kulu- tustuntia edeltävänä vuorokautena tulleista osto- ja myyntitarjouksista, jotka pörssi optimoi tietyt rajoitukset, kuten sähköverkon siirtokapasiteetin, huomioiden. [84] Nord Poolin tuntihintatiedot kuvaavat siis varsin luotettavasti sähkön todellista hintaa ja toisaalta myös ohjaustarvetta. Korkea sähkön pörssihinta voi viestiä poikkeuksellisen suuresta kulutuksesta, jota voidaan pienentää ohjattavilla kuormilla.

Sähkön hinta valittuna vuorokautena on esitetty kuvassa 16. Nähdään, että iltatunneille muodostuu selvä hintapiikki, jonka aikana lataaminen voitaisiin ohjata pois. Jos siis rajahinta olisi esimerkiksi 12 snt/kWh, kello 17 ja 19 välisenä aikana latauksessa olevat autot kytketään pois latauksesta. Tämän jälkeen lataaminen jatkuu niin kauan, kunnes akku on täynnä tai se keskeytyy, jos rajahinta saavutetaan uudestaan esimerkiksi aamun hintapiikin aikaan.



Kuva 16: Elspotin Suomen aluehinta helmikuussa 2012. Hinta on ilmoitettu snt/kWh ja se on laskettu erään viikon arkipäivien keskiarvona.

7.5 Mallin muodostaminen

Simulointimalli toteutetaan numeeriseen laskentaan tarkoitettulla MATLAB-ohjelmistolla. Tarkoituksena on toteuttaa ohjelma, joka kykenee simuloimalla mallintamaan tutkittavaa systeemiä ja muodostamaan tyyppikuormituskäyriä sähköautoille. Nyt mallinnettava systeemi on sähköautoilijoiden ajo- sekä latauskäyttäytyminen. Halutaan siis tietää, milloin, missä, kuinka paljon ja miten autoilijat lataavat. Kyseinen systeemi on siis todella kompleksinen ja luonteeltaan stokastinen eli se sisältää satunnaisia ilmiöitä. Lisäksi systeemi on diskreetti, sillä lähtötiedot saavat arvoja vain tietyissä pisteissä. Näin ollen toteutettavana on diskreetti stokastinen simulointimalli. Mallin muodostaminen sisältää siinä käytettyihin menetelmiin ja rakenteisiin perehtymisen sekä mallin verifiointin ja validoinnin.

7.5.1 Monte Carlo -simuloinnit

Tässä työssä muodostettava simulointimalli perustuu Monte Carlo -menetelmään. Kyseinen menetelmä on laajalti käytetty kirjallisuudessa. Esimerkiksi tutkimuksissa [56], [85] ja [86] Monte Carlo -menetelmää on käytetty sähköautojen käyttäytymisen mallintamiseen ja edelleen niiden aiheuttaman verkon kuormituksen tutkimiseen. Menetelmä perustuu satunnaislukujen käyttöön erilaisten stokastisten ja determinististen ongelmien ratkaisussa. Sitä käytetään nykyään muun muassa tilastollisten ongelmien ratkaisuun, kun analyttistä ratkaisua ei ole löydettävissä. [87]

Työssä on päädytty toteuttamaan simulointimalli Monte Carlo -menetelmällä, koska käytössä on Valtakunnallisen henkilöliikennetutkimuksen tulokset, jotka tarjoavat hyvät edellytykset menetelmän käytölle. Voidaan ajatella, että satunnaislukujen avulla tutkimustulokset puretaan takaisin yksittäisiksi kyselyn vastauksiksi. Toistamalla edelleen tätä satunnaista poimintaa saadaan satunnaisotos, joka pohjautuu lähtötietoihin mutta jota kuvaavat uudet tunnusluvut, kuten keskiarvot ja hajonnat.

Esimerkiksi henkilöautolla ajettujen matkojen pituusjakauma on henkilöliikennetutkimuksen mukaan kuvan 14 mukainen. Satunnaislukujen avulla tästä jakaumasta voidaan poimia otos, jolla on jakauman ominaisuudet, mutta jonka alkiot ovat täysin satunnaisesti valittuja. Samaa menetelmää voidaan soveltaa kaikille käytettävissä oleville jakaumille. Näin voidaan tilastollisesti yrittää mallintaa ihmisten todellista käyttäytymistä.

Menetelmässä keskeisessä roolissa ovat siis satunnaisluvut ja niiden avulla tapahtuva satunnaisotoksen poimiminen. Poimiminen tapahtuu käänteismenetelmällä (Inversion method), joka on perinteinen satunnaismuuttujien generointiin käytetty menetelmä. Siinä hyödynnetään satunnaismuuttujan todennäköisyysjakauman kertymäfunktioita sekä tasajakautuneita satunnaislukuja. Menetelmä on kuvailtu lähteessä [87]. Oletetaan diskreetti kertymäfunktio

$$F(x) = \sum_{i|x_i \leq x} p_i \quad x_i \in T, \quad (12)$$

missä x_i viittaa diskreetin satunnaismuuttujan X i :nteen arvoon, T on tämän satunnaismuuttujan saamien arvojen äärellinen joukko ja p_i on i :nteen arvoon liittyvä todennäköisyys. Kertymäfunktio F saa siis arvoja väliltä $[0,1]$. Jos poimitaan satunnaisluku R tasajakautumasta samalta väliltä, voidaan tämä luku sijoittaa kertymäfunktion käänteisfunktioon F^{-1} . Tällöin satunnaismuuttujaan liitettävä arvo x_i saadaan yhtälöstä

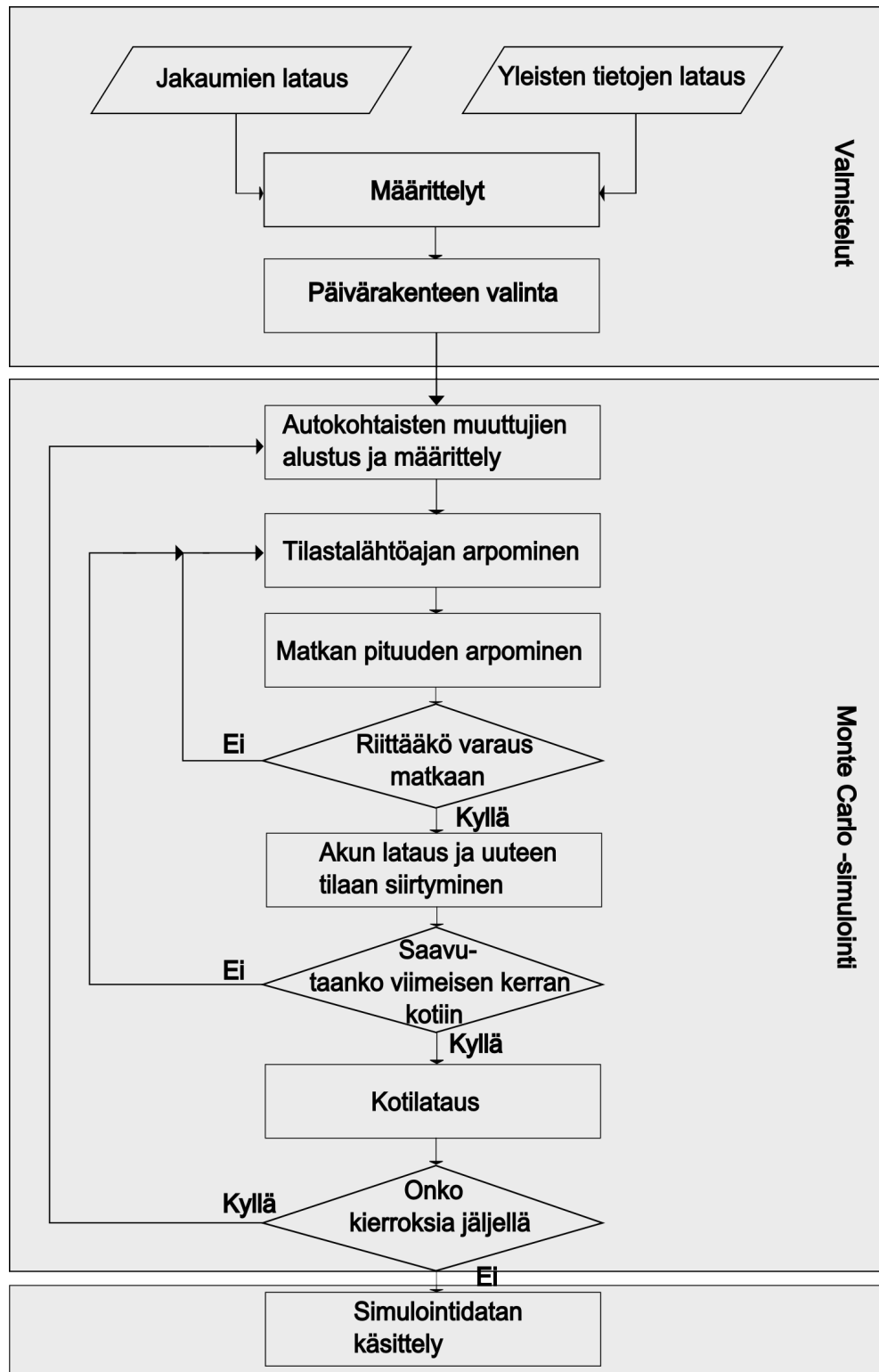
$$R < F(x_i), \quad (13)$$

missä x_i on pienin epäyhtälön toteuttava arvo. Satunnaislukujen generointiin käytetään MATLABin rand-funktiota, joka tuottaa tasajakautuneita näennäissatunnaisia lukuja.

Edellä kuvattua menetelmää käytetään simulointimallissa kaikissa satunnaisuutta vaativissa vaiheissa. Tällaisia ovat lähtöajat eri tiloista, siirtymisten pituudet sekä viivästetyssä lataamisessa latauksen aloitusaika. Satunnaistus kuvaa siis ihmisen jokapäiväiseen käyttöön liittyvien tapahtumien satunnaisuutta, mutta toistettaessa satunnaistusta tarpeeksi monesti todennäköiset tapahtumat toteutuvat muita useammin. Tämä on seurausta suurten lukujen laista, joka voidaan ilmaista esimerkiksi sen erityistapauksen mukaan: tietyn tapahtuman esiintymisfrekvenssi konvergoituu kohti sen todennäköisyyttä. [88]

7.5.2 Käytetty algoritmi

Kuvassa 17 on ohjelman käyttämä algoritmi esitetty vuokaaviona. Nähdään, että ohjelma jakautuu kolmeen osaan: valmisteluihin, Monte Carlo -simulointiin ja tulosten käsittelyyn.



Kuva 17: Vuokaavio ohjelman toiminnasta.

Valmisteluissa ohjelma ottaa käyttäjän määrittämät tiedot sisäänsä. Varsinaisessa simulointiosassa autojen liikkumista ja lataamista pyritään mallintamaan Monte Carlo -menetelmällä. Tulosten käsittely -osiossa muodostetaan simulointien tulosten pohjalta tyyppikuormituskäyrät.

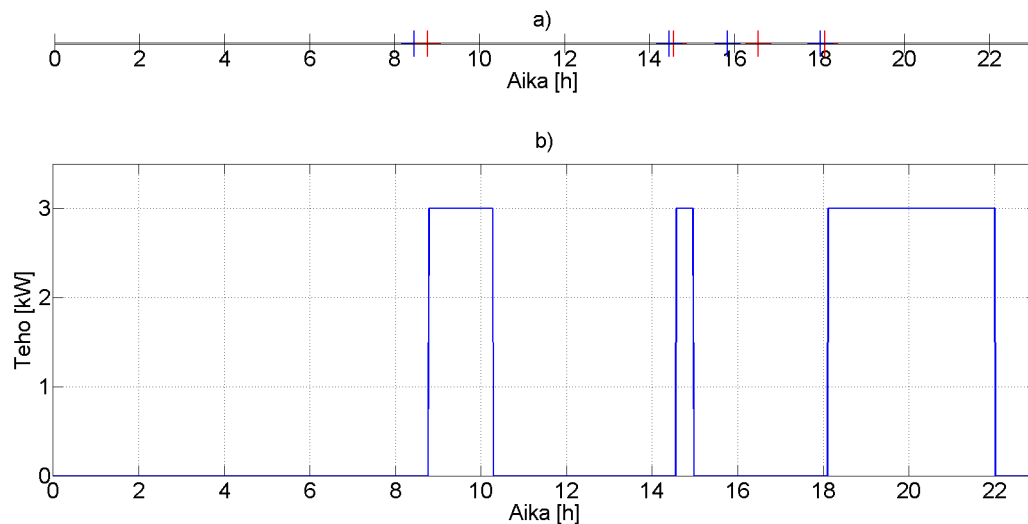
Valmisteluissa ohjelma ottaa luvussa 7.3 esitetyt lähtötiedot sisäänsä ja niiden pohjalta määritetään ohjelman myöhemmin käyttämiä muuttujia. Työmatkojen lähtöaikojen jakauman muodosta johtuen se jaetaan kahteen osaan, joista toista käytetään töihin menemistä ja toista töistä lähtemistä kuvaamaan. Jako tehdään kello kahden toista kohdalta, jolloin siis töihin mennään viimeistään ja sieltä lähdetään kotiin aikaisintaan tällöin. Valmistelujen yhteydessä aikajakaumien resoluutiota kasvatetaan, sillä henkilöliikennetutkimuksesta saatavat jakaumat ovat tunnin tarkkuudella. Jotta päivien välisen käyttäytymisen eroja saadaan kasvatettua ja toisaalta latauksen kesto mallinnettua tarkasti, jakaumien resoluutiota kasvatetaan yhteen minuuttiin. Resoluution kasvattamisessa käytetään lineaarista interpolointia. Lisäksi valmisteluissa syötetyistä jakaumista tehdään todennäköisyysjakaumia eli ne skaalataan niin, että jakauman arvojen summa on yksi.

Seuraavaksi määritetään haluttu päivärakenne, jota jokaisella silmukan kierroksella tutkitaan. Jokainen silmukan kierros vastaa yhtä Monte Carlo -simulointia. Aluksi alustetaan ja määritetään autokohtaiset muuttujat. Simuloinnin runko koostuu tilanvaihdoksista ja mahdollisesta lataamisesta. Tilanvaihdoksissa arvotaan lähtöaika kyseistä matkan tarkoitusta kuvaavasta tuntijakaumasta sekä matkan pituus. Tämän jälkeen tutkitaan, riittääkö akuston varaus kyseiseen matkaan. Jos riittää, siirrytään seuraavaan tilaan ja jos ei, arvotaan uusi lähtöaika ja matkan pituus. Tämä toistuu niin kauan, että siirtyminen on mahdollista. Järkevillä lähtöparametreilla jumiutumista ei pääse tapahtumaan. Toisaalta menettelyllä annetaan autolle lisää aikaa ladata kyseisessä paikassa, jos lataaminen on siellä mahdollista. Siirtymien yhteydessä tutkitaan myös, voiko perillä ladata. Jos perillä ei voi ladata, täytyy auton akustossa olla virtaa vielä edestakaiseen matkaan. Kun auto lopulta pääsee siirtymään seuraavaan tilaan, sen akun varaus päivitetään edellisen paikan latauksen ja matkalla kulutetun energian mukaan. Saavuttaessa viimeisen kerran kotiin aloitetaan yön yli tapahtuva kotilataus syötteenä annetun latausparametrin mukaan joko ohjaamattomana tai ohjattuna. Tämän jälkeen siirrytään seuraavaan silmukan kierrokseen.

Ohjelmassa pidetään jokaisen auton kohdalla kirjaa meneillään olevasta vuorokaudenajasta. Simulointi aloitetaan keskiyöstä ja se päättyy, kun auton akku on ladattu illalla alkavassa kotilatauksessa täyteen. Koska lähtöaikojen jakaumat on määritetty vain yhdelle vuorokaudelle, autot pakotetaan lähtemään kotia kohti viimeistään keskiyöllä (24 tuntia simuloinnin aloitushetkestä). Kotilataus tapahtuu kuitenkin normaalisti niiden saavuttua kotiin. Vuorokauden ajanhetken seuraamisen päättarkoitus on kuitenkin estää auton epäkronologinen käytös eli auto ei voi esimerkiksi lähteä kaupasta ennen sinne menoa. Tämän seurauksena tilanvaihdokset riippuvat aikaisemmista vaihdoksista.

Lataaminen tapahtuu vakioteholla eli yhden auton latauskäyrä on vaakasuora vii-

va koko latauksen ajan. Approksimaatiota voidaan pitää oikeutettuna teoriaosion perusteella. Tällöin yhden simuloitun auton latauskäyttäytyminen näyttää esimerkiksi kuvassa 18 esitetyltä (alempi kuvaaja). Kuvassa 18 on esitetty samalle autolle tilasta lähtöajat ja tilaan saapumisaajat. Kyseinen auto käy päivällä kotoa töissä ja illalla kotoa vapaa-ajan ajossa. Kuvan 18 mukaan auto lähtee kotoa aamu kahdeksan jälkeen ja saapuu töihin hieman ennen yhdeksää, missä se lataa akun täyteen. Töistä kotiin auto lähtee kello kahden jälkeen ja saapuu kotiin ennen puoli kolmea. Kotona akku ladataan jälleen täyteen. Hieman ennen neljää auto lähtee vapaa-ajan ajoon ja saapuu määränpäähensä noin puoli viideltä. Kotiin auto palaa noin kello kuusi, jolloin aloitetaan kotilataus.

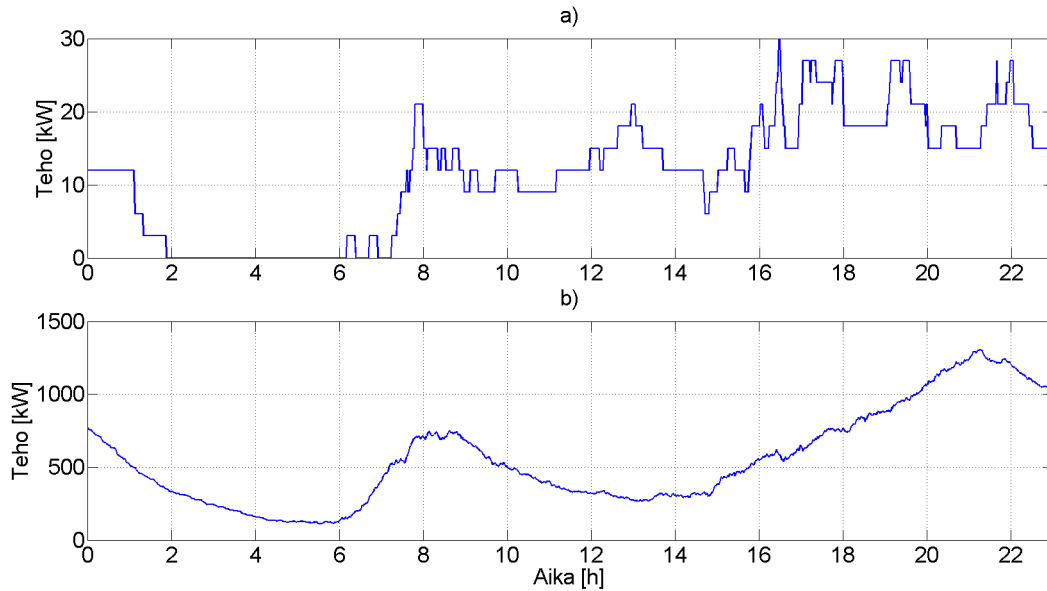


Kuva 18: Satunnaisen auton tilasta lähtöajat (sininen risti) ja tilaan tuloajat (punainen risti) (a) sekä latauskäyrä (b). Tutkittu auto voi ladata vain töissä ja kotona.

Ohjelman viimeisessä eli tuloksien käsittelyyn keskittyvässä osiossa suoritetaan tuntikäyrien muokkaukset sekä korrelaatioanalyysi. Aluksi lasketaan kuvan 18 kaltaisista käyristä jokaiselle silmukan kierrokselle jokaiselle tunnille lataustehon keskiarvot. Nyt tehtävissä simuloinneissa silmukassa on kierroksia 3650. Tyypikkäyrät muodostetaan laskemalla jokaiselle vuorokauden tunnille keskiarvot ja hajonnat käyttämällä jokaisen simulointikierroksen tutkittavan tunnin arvoa (3650 arvoa). Simulointikierrosten määrä on valittu niin, että tyypikkäyrissä yhdenkään vuorokauden tunnin keskiteho ei enää muutu merkittävästi kahden peräkkäisen simulointikierroksen välillä. Tällöin tulokset ovat supistuneet lähelle lopullista muotoaan ja suuret vaihtelut käyristä ovat tasoittuneet.

Kuvassa 19 on vielä havainnollistettu ohjelman toimintaa. Se esittää tilannetta, kun summataan kuvassa 18 käytetyn tyypin autoja. Nähdään, kuinka ohjelman käyttämä satunnaistus saa käyrän muodon tasoittumaan. Simuloinnin ja kuvan tarkkuus on yksi minuutti. Kyseessä ei ole siis mikään tyypikkäyrä, vaan yksittäisten simulointien summa. Korrelaatioiden laskenta suoritetaan MATLAB:in `corrcoef`-funktioilla ja

laskemalla lopuksi keskiarvot kaikkien autojen korrelaatioiden väliltä. Korrelaatiot kuvaavat samaan tyyppiin kuuluvien autojen tuntikeskitehojen riippuvuuksia.



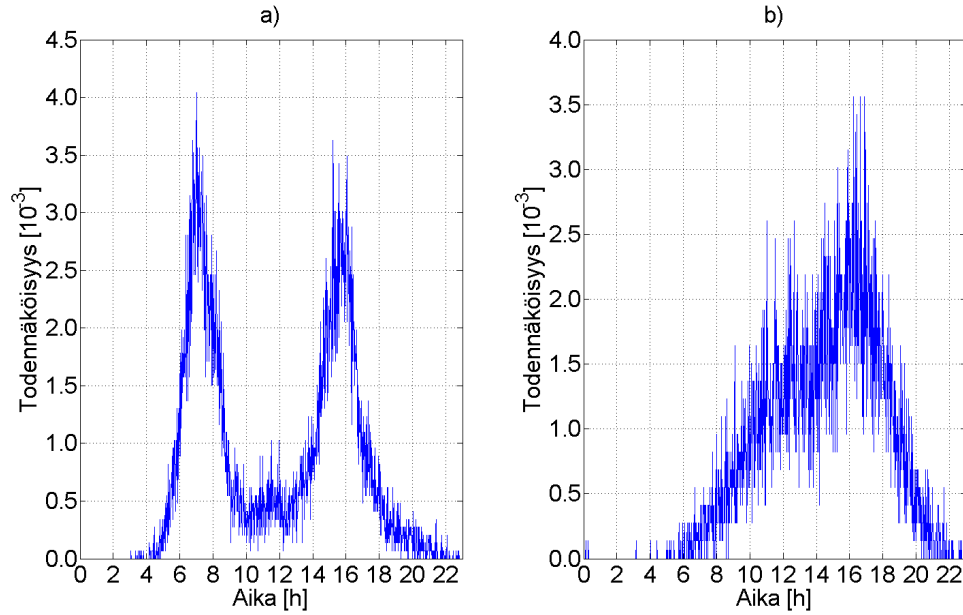
Kuva 19: Latauskäyrän tasoittuminen lataajien määrän lisääntyessä. a) 20 autoa. b) 1000 autoa.

7.6 Verifiointi ja validointi

Simuloinnit ovat käytännöllinen menetelmä systeemin tutkimiseen, jos esimerkiksi todellisia mittaustuloksia halutaan verrata johonkin tai halutaan suorittaa alustavia analyyseja. Simulointimallin muodostamisessa on kuitenkin suuri riski, että sen antamat tulokset eivät ole todenmukaisia. Syynä voivat olla mallin toteuttamisessa tehdyt virheet tai jo mallin määrittelyssä tapahtuneet virheet tai väärin ymmärrykset. Tämän takia malli täytyy verifioida eli todentaa, että malli on toteutettu oikein, sekä validoida eli todentaa, että malli kuvaa haluttua systeemiä [87].

Tässä työssä verifiointi on toteutettu vertailemalla ohjelman generoimia jakaumia lähtötietoihin, tutkimalla simulointien välistä korrelaatiota, tutkimalla tulosten jakaumia sekä arvioimalla tulosten mielekkyyttä. Kuvassa 20 on annettu kaksi esimerkkiä ohjelman generoimista lähtöaikojen todennäköisyysjakaumista. Ohjelmaan syötetyistä kuvan 15 mukaisista jakaumista on siis poimittu ohjelman käyttämällä Monte Carlo -menetelmällä lähtöaikoja autoille. Jakaumien tarkkuus on 1 minuutti ja niistä on poimittu 10000 näytettä. Viivan korkeus kuvaa siis kyseisen ajanhetken sattumisen suhteellista määrää simuloinnissa. Kuvasta 20 nähdään, että generoituneet jakaumat ovat hyvin samankaltaisia lähtötietoina käytettyjen kuvan 15 työmatkaa sekä vapaa-ajan matkaa kuvaavien todennäköisyysjakaumien kanssa.

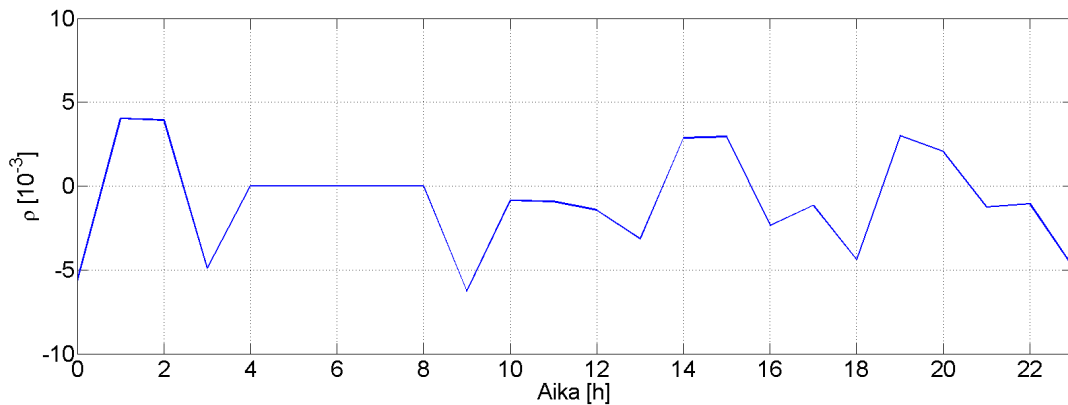
Kuvassa 21 on tutkittu tiettyyn tyyppiin kuuluvien sähköautojen lataamisen tuntikeskitehojen keskimääräistä korrelaatiota tunnin aikana. Nähdään, että lataustehot



Kuva 20: Ohjelman lähtötiedoista generoimat todennäköisyysjakaumat. a) työmatkat ja b) vapaa-ajan matkat

eivät korreloi (korrelaation arvo on lähes nolla kaikkina vuorokauden tunteina). Tulos on mielekäs, sillä jokaisen yksittäisen simuloinnin tulee olla riippumaton muista simuloinneista.

Liitteen A kuvissa A1 ja A2 on tutkittu tietyn tyyppin eri autojen lataamisen tuntikeskitehojen hajontaa tietyn tunnin sisällä. Kello 19 – 20 välisenä aikana saavutetaan tutkitussa tapauksessa vuorokauden huipputeho. Kello 23 – 24 on taas pienen latauskuorman tunti. Nähdään, että yksittäistä autoa ladattaessa jakauma ei muistuta mitään tavanomaista todennäköisyysjakaumaa. Suurin osa autoista ei lataa ol-

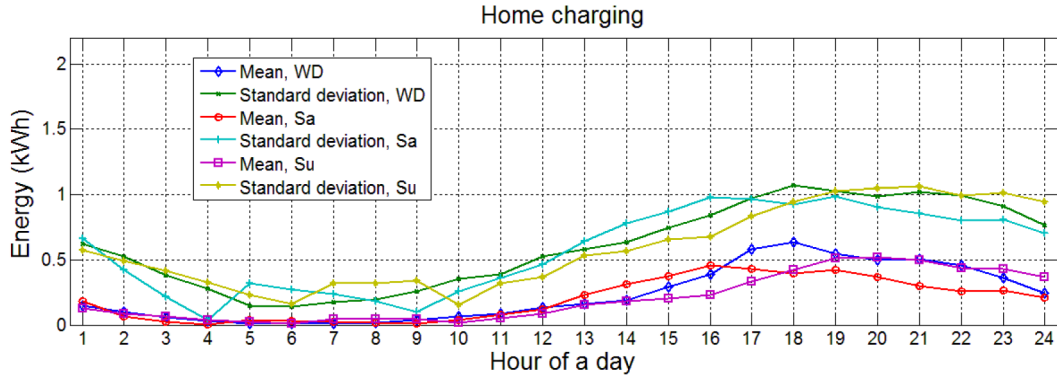


Kuva 21: Lataamisen tuntikeskitehojen korrelaatio ρ vuorokauden eri tunteina tietyn tyyppin sisällä.

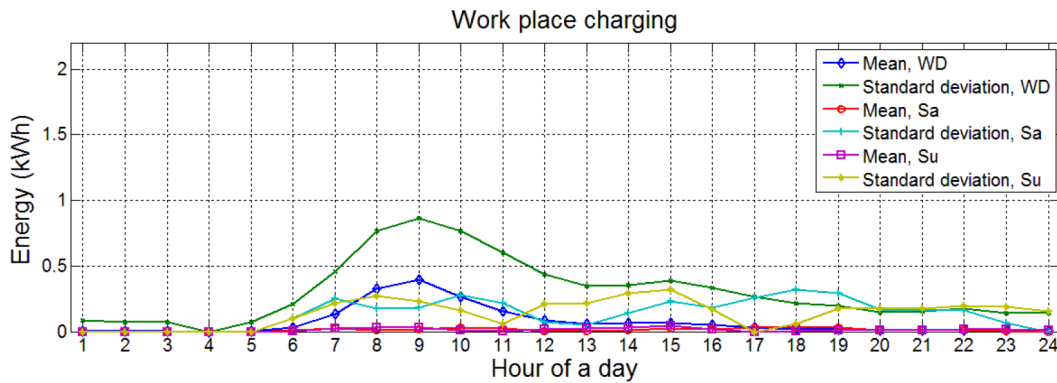
lenkaan tai niiden lataamisen tuntikeskiteho vastaa käytettyä lataustehoa (kuvassa käytetty 3 kW). Jos taas tutkitaan 50 auton latauksen summatehoa saman tunnin aikana, jakauma muistuttaa hyvin paljon normaali jakaumaa. Mallin tuottamat tulokset vastaavat siis hyvin luvussa 7.1 käsitellyä teoriaa. Pienen latauskuorman aikana summatehon jakauma muistuttaa lognormaalia jakaumaa. Tämä johtuu siitä, että tuntikuormituskäyrä on laskeva myöhään illalla eli yhä useampi auto saa ladata akustonsa täyteen, jolloin keskitehot ovat huipputuntia pienemmät. Jakauma ei luonnollisesti myöskään voi saada negatiivisia arvoja. Lisäksi kuvista nähdään, että voimakkaan kuormituksen tunnilla jo kymmenellä autolla jakauma on hyvin lähellä normaalia. Pienellä kuormalla vasta viidelläkymmenellä autolla jakauma alkaa muistuttaa normaalia.

Toteutetun ohjelman antamien tulosten mielekkyyttä voidaan arvioida liitteessä B esitettyjen tyyppikuormituskäyrien perusteella. Liitteessä tutkitaan lähtöparametrien varioinnin vaikutusta latauskäyrään. Eri lähtöparametreja käytettäessä tulee parametrien muutosten vaikuttaa lopputulokseen teorian ennustamalla tavalla. Kuvissa on varioitu yhtä parametria kerrallaan ja piirretty kolmella eri parametrin arvolla saadut käyrät samaan kuvaan. Nähdään, että kaikki parametrit vaikuttavat, kuten niiden kuuluukin. Eriyksen herkkä latauskäyrä vaikuttaa olevan auton kulutukselle. Keskinopeus taas ei juuri muuta lopputulosta.

Sähköautojen määrän ollessa pieni ei simulointimallin tuloksia voida luonnollisesti vertailla todellisiin mittaustuloksiin, minkä takia mallia ei voida validoida. Kirjallisuudesta löytyy kuitenkin aiheeseen liittyviä tutkimuksia, joihin mallin tuloksia voidaan vertailla. Lähteessä [89] on tutkittu Valtakunnalliseen henkilöliikennetutkimukseen pohjautuen lataushybridien latauksen kuormituskäyrää. Mallintamisessa on huomioitu pitkälti samoja asioita kuin tässä työssä, mutta käytetty algoritmi on erilainen. Kuvassa 22 on esitetty kotilataus talvella arkena, lauantaina ja sunnuntaina. Tutkittujen autojen kulutukset noudattavat normaali jakaumaa, jonka keskiarvo on 0,20 kWh/km ja hajonta 0,02 kWh/km. Akuston kapasiteetit noudattavat normaali jakaumaa, jonka keskiarvo on 18 kWh ja hajonta 1 kWh. Autoja ladataan 3 kW:n teholla työpaikalla ja kotona. Kuvassa 23 on esitetty vastaava työpaikalla tapahtuvan lataamisen kuormituskäyrä. Kuvien 22 ja 23 tapauksessa päiväkohtaista matkalukua ei ole määritetty toisin kuin tässä työssä eli eri autot ajavat eri määrän matkoja päivässä, mikä lisää tulosten hajontaa. Tässä työssä saadut latauskäyrät ovat saman suuntaisia kuin lähteessä [89] saadut.



Kuva 22: Kotilatauksen tuntikeskiteho ja hajonta talvella arkena, lauantaina ja sunnuntaina. [89]



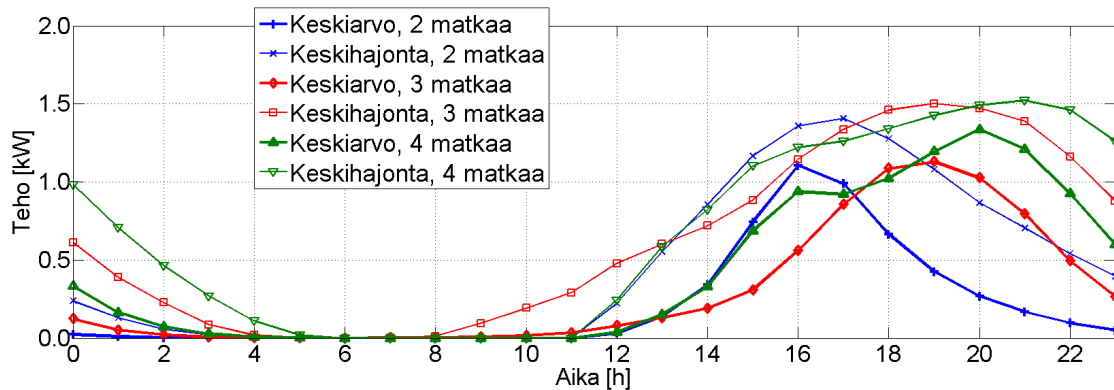
Kuva 23: Työpaikkalatauksen tuntikeskiteho ja hajonta talvella arkena, lauantaina ja sunnuntaina. [89]

7.7 Simulointimallilla saatuja latauskäyriä

Tässä luvussa on esitetty muutamia simulointimallilla muodostettuja sähköautojen tyyppikuormituskäyriä. Lisää käyriä simuloitaessa eri parametreilla on esitetty liitteissä B ja C. Osaa esitettyjen käyrien datasta on hyödynnetty muuntajien kuormitusta tutkittaessa, mutta osa käyristä on esitetty vain kuvaamaan toteutetun simulointimallin toimivuutta.

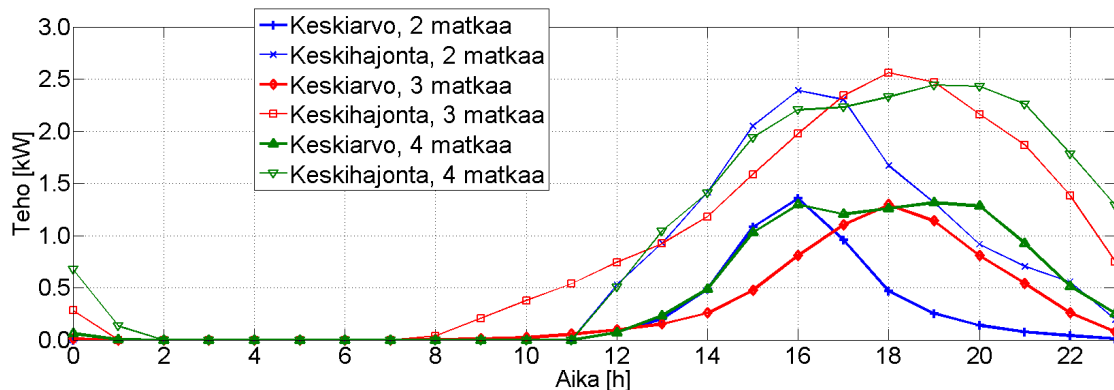
Kuvassa 24 sekä liitteiden kuvissa C1 ja C2 on esitetty sähköauton latausta kotona arkena, aattona ja pyhänä. Auton kulutus on 0,2 kWh/km ja lataaminen tapahtuu 3,7 kW:n teholla vain kotona. Arkipäivän aikana auto käy kotoa töissä (2 matkaa), menee suoraan töistä vapaa-ajan ajoon (3 matkaa) ja menee töistä kotiin ja sieltä vapaa-ajan ajoon (4 matkaa). Nähdään, että arjen latauskäyrät poikkeavat aaton ja pyhän latauskäyristä, kun taas aaton ja pyhän välillä ei ole juuri eroa. Kaikissa tapauksissa lataus ajoittuu selvästi ilta-aikaan, mutta aattona ja pyhänä teho kasvaa melko tasaisesti aamusta alkaen. Keskihajonta on koko ajan keskitehoa suurempi,

mutta pienenee suhteessa keskitehoon lataushuippujen aikana. Hajonnan ja keskitehon väliset erot kuitenkin kasvavat, jos ladataan päivän aikana kodin ulkopuolella (kuvat C3 ja C4).



Kuva 24: Sähköauton lataus arkena. Lataus tapahtuu 3,7 kW:n teholla vain kotona.

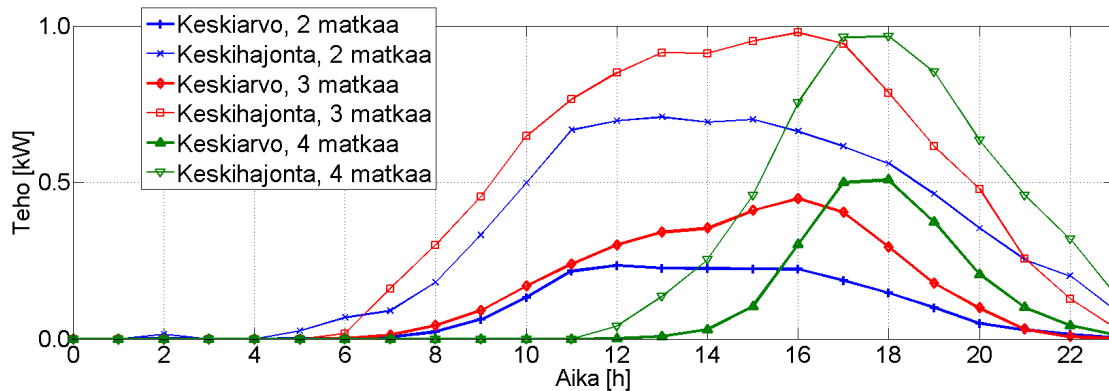
Kuvassa 25 on esitetty latauskäyrä ladattaessa kolmivaiheisesti. Tilanne vastaa muuten kuvaa 24, mutta nyt latausteho on 11 kW. Keskitehojen huippuarvot eivät juuri muutu 1-vaihelataukseen verrattuna, mutta keskihajonnat kasvavat selvästi. Lisäksi latausajat lyhenevät. Kuvissa (kuvat C5 ja C6) on esitetty vastaava tilanne, kun ladataan lisäksi töissä sekä töissä ja julkisessa latauksessa.



Kuva 25: Sähköauton 3-vaiheinen lataus arkena vain kotona.

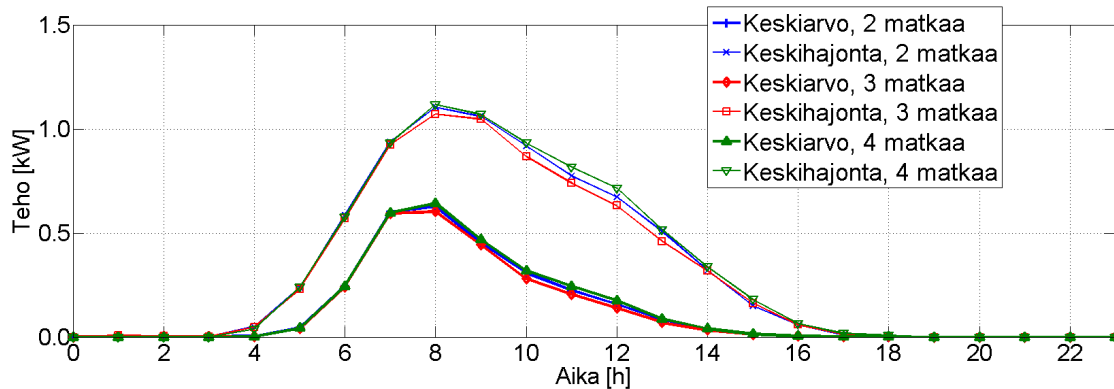
Kuvassa 26 on esitetty lataus julkisessa latauspisteessä, kun auto menee suoraan kotoa vapaa-ajan ajoon (2 matkaa), töistä vapaa-ajan ajoon (3 matkaa) ja kun auto menee töistä kotiin ja sieltä vapaa-ajan ajoon (4 matkaa). Tapaus, jossa mennään suoraan kodista vapaa-ajan ajoon, vastaa aaton päivä-rakennetta, sillä sitä ei ole ohjelmassa erikseen määriteltä arjelle. Ero on kuitenkin pieni. Näitä julkisen latauspisteiden käyriä voidaan verrata vastaaviin kotilatauskäyriin. Kolmen ja neljän matkan osalta latauskäyrien huiput ajoittuvat vain hieman aikaisemmiksi kuin kotona ladattaessa kuvassa 24. Keskitehojen ja -hajontatojen väliset erot ovat suuret, mikä johtuu lyhyistä latausajoista. Kahden matkan käyrää voidaan verrata kahden mat-

kan kotilatauskäyrään kuvassa C1. Kotilatauksen huippu ajoittuu hetkeen, jolloin lataus julkisessa pisteessä on selvästi vähentynyt.



Kuva 26: Sähköauton lataus julkisessa latauksessa, kun autoa ladataan 3,7 kW:n teholla kotona ja julkisessa latauspaikassa.

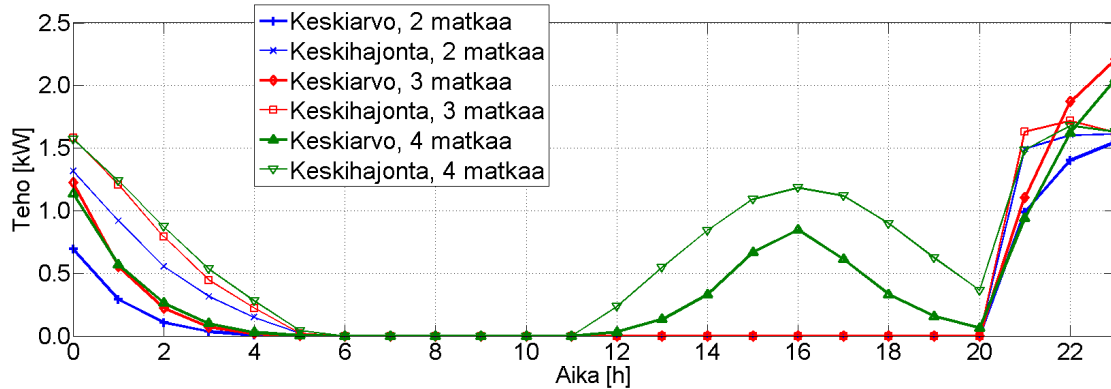
Työpaikalla tapahtuvaa latausta on havainnollistettu kuvassa 27, kun lataus tapahtuu 3,7 kW:n teholla ja auton kulutus on 0,2 kWh/km. Latausteho menee nolleen kello viidentoista ja seitsemäntoista välillä, jolloin suurin osa autoista lähtee töistä. Tehokäyrä on melko huipukas, mikä viestii, että autot ehtivät ladata akustonsa täyteen tai lähes täyteen työpäivän aikana. Kuvasta nähdään myös, että ajettavien matkojen määrä ei juuri vaikuta työpaikan latauskäyrän muotoon. Tämä johtuu siitä, että työpaikalle saavutaan aina ensimmäisenä.



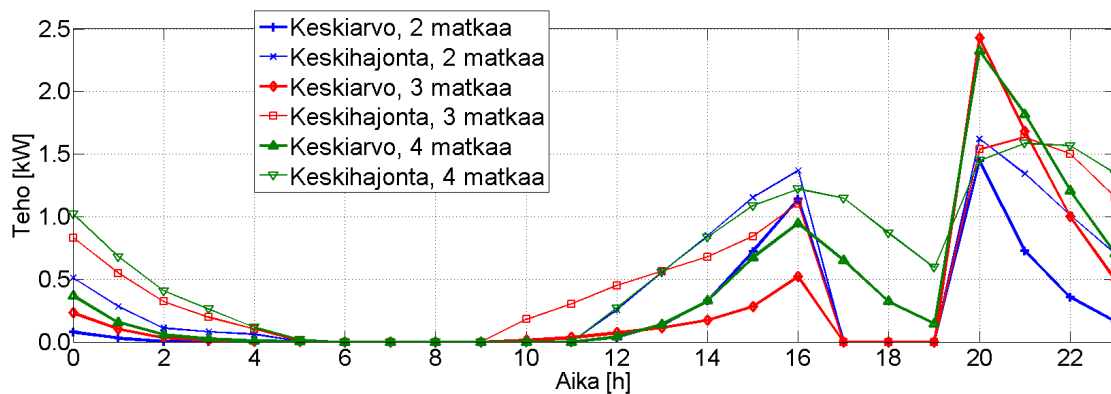
Kuva 27: Sähköauton hidas lataus työpaikalla.

Kuvissa 28 ja 29 on havainnollistettu lataamisen ohjausta latausta viivästyttämällä ja ohjaamalla sähkön hinnan mukaan. Muuten tilanne vastaa kuvaa 24. Ohjaukset vaikuttavat toimivan, kuten luvussa 7.4 kuvattiin. Huipputehot kasvavat kuitenkin huomattavasti kuvan 24 tilanteen verrattuna ja hajonta pienenee suhteessa huipputehoon. Etenkin hintaohjauksen tapauksessa nähdään selvä tehopiikki samanaikaisista latauksen päällekytkennöistä johtuen. Ohjauksesta huolimatta autot ehtivät ladata helposti seuraavaan aamuun mennessä. Kummassakin kuvassa neljän matkan

käyrässä esiintyvä lataus kello 16 ympärillä johtuu siitä, että auto ei ole saapunut vielä viimeistä kertaa kotiin vuorokauden aikana. Kuvassa C8 on vielä havainnollistettu viivästettyä latausta, kun latausta on viivästetty ja porrastettu kuvan 28 tapausta enemmän.

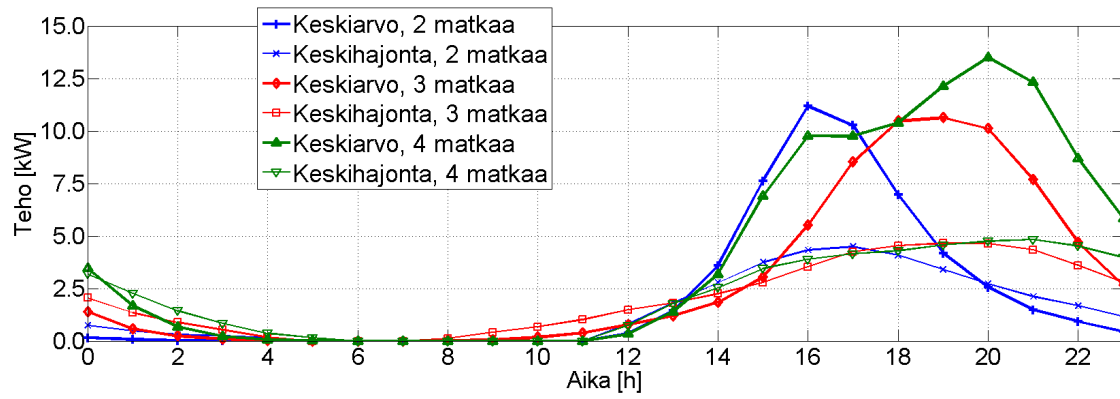


Kuva 28: Latauksen ohjaaminen viivästämällä. Lataus tapahtuu 3,7 kW:n teholla vain kotona.



Kuva 29: Latauksen hintaohjaus. Lataus 3,7 kW:n teholla vain kotona.

Tulee huomata, että jokaisessa kuvassa jopa tuntikeskitehon huippuarvo jää selvästi alle todellisen lataustehon. Edes hajonnan huomioiminen ei yleensä kasvata tehoa tarpeeksi. Yhden auton latausteho on todellisuudessa kuitenkin lähes vakio koko latauksen ajan. Latauskäyriä tuleeikin hyödyntää usean auton latauksen tutkimisessa, jolloin niiden käytölle saadaan järkevä tulkinta. Kuvassa 30 on esitetty kuvan 24 latauskäyrän summakäyrä, kun ladataan kymmentä kyseisen tyyppin sähköautoa. Nyt esimerkiksi kahden matkan autojen summateho kello 16 – 17 on noin 11 kW. Tämä voidaan tulkita, että keskimäärin noin kolme autoa kymmenestä lataa teholla 3,7 kW kyseisen tunnin aikana. Jos hajonta huomioidaan, lataavia autoja on keskimäärin noin 2 – 4 kyseisellä tunnilla. Latauskäyrien käytettävyyys paranee, kun summattavien autojen määrä kasvaa. Tällöin tuntien sisällä keskitehojen jakauma alkaa muistuttaa normaalijakaumaa (luku 7.6).



Kuva 30: Kymmenen sähköauton lataus arkena. Lataus tapahtuu 3,7 kW:n teholla vain kotona.

8 Jakelumuuntajien kuormittumisen tutkiminen

Tässä luvussa tutkitaan sähköautojen (PHEV ja EV) lataamisen vaikutusta pääkaupunkiseudun pienjänniteverkkoon. Tutkittavina pääkohteina ovat jakelumuuntajat viideltätoista asuinalueelta. Muuntajien kuormittumista tutkitaan sähköautojen eri penetraatioilla, latauskäyttäytymisillä sekä ohjattuna että ohjaamattomana. Lisäksi tutkitaan esimerkkeinä jakelumuuntajia kahden työpaikka-alueen ja yhden palvelualueen tapauksessa.

8.1 Tutkittavat jakelumuuntajat

Tässä työssä tutkitaan yhteensä kahdeksaatoista jakelumuuntajaa, jotka sijaitsevat pääkaupunkiseudulla. Muuntajista viisitoista sijaitsee alueilla, joiden rakennuskanta koostuu pääasiassa asuintaloista. Kaksi muuntajista on alueilla, joissa on pääasiassa toimistotaloja, ja yksi on alueella, jossa on pääasiassa palvelurakennuksia.

Taulukkoon 6 on koottu asuinalueiden muuntajiin liittyviä keskeisiä tietoja sekä nimetty muuntajat työssä esitettäviä kuvaajia varten. Taulukossa pääkuluttajaryhmiksi on valittu ne kuluttajaryhmät, joiden kulutus muodostaa suurimman osan muuntajan vuosienenergiasta. Kuluttajia-sarakkeessa on esitetty muuntajiin liittyvien kuluttajien summa. Autoja max. -sarake esittää eri alueiden 100 % penetraatiota vastaavat automäärät (luku 8.2). Vastaavasti tiedot palvelualueesta ja työpaikka-alueista on koottu taulukkoon 7. Taulukkoihin on merkitty viivalla ne tiedot, joita ei ollut saatavilla tätä työtä tehtäessä.

Taulukoissa esitettyjen tietojen lisäksi tiedetään eri kuluttajaryhmien tyyppikuormituskäyrät (SLY-käyrät), joita voidaan käyttää muuntajien kuormituksen laskeamiseen. Tämä kuormitus on siis peruskuorma, johon sähköautojen latauskuorma summataan. Työssä ei pyritä ennustamaan muuntajien tulevaa kuormitusta, vaan ainoastaan tutkimaan, miten lataus vaikuttaa niiden kuormittumiseen sähköautojen penetraation kasvaessa. Tämän takia käytetään muuntajien nykyistä kuormitusta eikä oteta suoraan kantaa, mille vuodelle tutkittavat sähköautopenetraatiot ajoittuvat.

Asuinalueiden muuntajat saavuttavat huipputehonsa pääasiassa aattona toisen kaksiviikkojakson eli tammikuun puolivälin jälkeen. Palvelualueella ja työpaikka-alueilla huipputeho taas ajoittuu arkipäivälle samalle kaksiviikkojaksolle. Tässä työssä tutkitaan kuitenkin ensimmäisen kaksiviikkojakson arkea, joka ei huomattavasti poikkea muuntajien todellisesta huippuvuorokaudesta.

Taulukko 6: Asuinalueiden muuntajiin liittyviä tietoja.

Muuntaja	Nimellisteho [kVA]	Asennus- vuosi	Pääkuluttaja- ryhmä	Kuluttajia [kpl]	Vuosienergia [kWh]	Autoja max. [kpl]
M1	500	-	Asum. ktal.	383	1706130	377
M2	500	1989	Sl. suora, osit. var.	52	1033760	49
M3	1000	2003	Lämpöpump. osit. var.	74	1413510	72
M4	315	1986	Asum. omak.	53	576780	49
M5	500	1981	Asum. ktal.	255	1215290	249
M6	500	1984	Sl. suora, osit. var.	103	1426610	89
M7	315	1986	Sl. suora,, osit. var.	58	724190	58
M8	630	2009	Asum. omak., sl. suora	69	717840	69
M9	1000	2001	Sl. suora, osit. var.	120	1732219	120
M10	800	1981	Sl. suora, osit. var.	118	1575475	118
M11	500	2007	Rivi-, ktal.	88	604630	85
M12	1000	1981	Sl. suora, osit. var.	96	1359110	96
M13	630	2002	Rivi-, ktal.	153	896430	153
M14	630	2003	Rivi-, ktal.	262	864170	261
M15	800	1984	Asum. omak., osit. var.	64	1019323	64

Taulukko 7: Palvelualueen ja työpaikka-alueiden muuntajiin liittyviä tietoja.

Muuntaja	Nimellisteho [kVA]	Asennus- vuosi	Alue	Kuluttajia [kpl]	Vuosienergia [kWh]	Autoja max. [kpl]
M16	1000	1987	Palvelu	50	2827650	250
M17	800	1983	Työpaikka	42	1822170	700
M18	1600	2001	Työpaikka	29	2939040	700

8.2 Sähköautojen sijoittaminen jakelumuuntajille

Jakelumuuntajien kuormittumista tutkitaan 10 %, 50 % ja 100 % sähköautopenetraatioilla. Näihin penetraatioihin voidaan ajatella sisältyvän täyssähköautot sekä lataushybridit, joiden oletetaan ajavan pelkästään sähköllä. Valitsemalla penetraatiot näin ja esittämällä tulokset sopivalla tavalla saadaan esille latauksen verkostovaikutukseen liittyviä trendejä. Lisäksi penetraatioihin voidaan sisällyttää epävarmuustekijöitä, kuten asutokuntien autojen määrät sekä päivän aikana ajossa olevien autojen määrät.

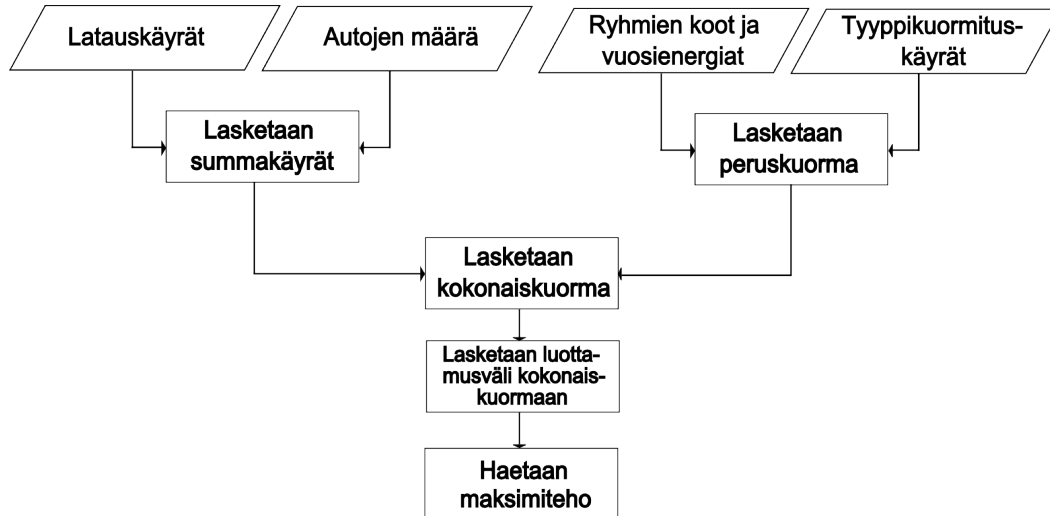
Sadan prosentin penetraatiota vastaava automäärä voidaan arvioida suurpiirteisesti nykyisen autokannan ja asutokuntien määrän perusteella. Helsingissä oli vuonna 2011 asutokuntia noin 310 000 [90] ja autoja noin 210 000 [91]. Espoossa oli vuonna 2011 asutokuntia noin 110 000 [90] ja autoja noin 110 000 [91]. Vantaalla taas oli vuonna 2011 asutokuntia noin 90 000 [90] ja autoja noin 90 000 [91]. Henkilöliikennetutkimuksen [5] mukaan yhden auton kotitalouksia on noin 50 %, kahden auton 30 % ja yhtään autoa ei ole noin 17 %:ssa kotitalouksista. Lopussa kotitalouksista on yli kaksi autoa. Tutkittaessa jakelumuuntamon kuormittumista voidaan siis sadan prosentin penetraatiolla karkeasti sijoittaa yksi auto asutokuntaa eli muuntajan asumiseen liittyvän asiakasryhmän yhtä kuluttajaa kohden. palvelualueella ja työpaikka-alueilla 100 % penetraatio vastaa arviota parkkialueiden autopaikkamäärästä.

8.3 Tutkimusmenetelmät ja -tavoitteet

Muuntajien kuormittumista tutkitaan laskemalla ensin niiden peruskuorma tutkittavalle vuorokaudelle ja summataan tähän muuntopiirin alueella olevien sähköautojen latauskäyrät, jolloin saadaan muuntajan kokonaiskuormitus. Laskenta suoritetaan MATLAB-ohjelmistolla. Laskennan vaiheita kuvaava vuokaavio on esitetty kuvassa 31.

Aluksi lasketaan jokaiselle muuntajalle tutkittavan vuorokauden peruskuorma. Tätä varten ohjelmaan luetaan jokaisen muuntajan kuluttajaryhmien koot, vuosienergiat sekä tyyppikuormituskäyrät. Peruskuorma lasketaan vuoden ensimmäisen kaksiviikkokajakson arkipäivälle. Tyyppikuormituskäyrästä tuntikeskitehot ja niiden keskihajonnat saadaan kaavoilla 4 ja 5. Koska asiakasryhmälle tiedetään vain kokonaisvuosienergia, hajontaa ei voida käyttää suoraan, sillä asiakasryhmien koot eivät huomioidu. Tämän takia hajonta tulee jakaa ryhmäkoon neliöjuurella. Näin voidaan tehdä, jos kuluttajien vuosienergiat oletetaan ryhmien sisällä yhtä suuriksi ja heidät keskenään oletetaan riippumattomiksi. Kyseinen tulos voidaan johtaa kaavoista 5 ja 9. Lopullinen hajonnan kaava on muotoa

$$\sigma_P(t) = \frac{1}{\sqrt{n}} \left(\frac{W_{\text{sum}}}{8760} \cdot i_{\text{vrk},\sigma} \right), \quad (14)$$



Kuva 31: Kuormituksen laskennan vaiheita kuvaava vuokaavio.

missä n on tyyppiin kuuluvien sähkönkäyttäjien määrä ja W_{sum} on tyyppin käyttäjien vuosienergioiden summa.

Sähköautojen latauskäyrät muodostetaan luvussa 7 esitetyn mukaisesti. Jokaista muuntajaa tutkitaan ainoastaan talvella arkena, joten latauskäyrät muodostetaan käyttäen kylmän sään kulutusta ja arjen päivärakenteita. Sähköautoihin liittyvät parametrit on esitetty luvussa 7.3. Muuntajan alueelle sijoitettavien autojen määrää on käsitelty luvussa 8.2. Ellei toisin mainita verkkoon sijoitettavien autojen määrä jaetaan kolmeen osaan, joista yksi osa ajaa kaksi matkaa päivässä, toinen kolme ja kolmas neljä matkaa. Tällöin autolla ajettujen matkojen kokonaismatkaluku on kolme ja hajontaa saadaan yhtä autotyyppiä enemmän.

Summattaessa tuntikeskitehoja ja keskihajontoja yhteen voidaan soveltaa luvussa 7.1 käsiteltyä teoriaa. Summaamista tarvitaan laskettaessa muuntajan perus- ja kokonaiskuormaa sekä sähköautojen latauksen summakäyrää. Perustapauksessa oletetaan kaikki muuntajille summattavat kuormat riippumattomiksi. Verifioinnin yhteydessä (luku 7.6) todettiin sähköautot keskenään riippumattomiksi, joten oletus on järkevä sähköautojen osalta. Eri kuluttajaryhmille tämä oletus joudutaan tekemään, koska parempaa tietoa ei ole. Työssä tutkitaan kuitenkin tapaukset, joissa muuntajan asiakasryhmien ja vastaavaan ryhmään kuuluvien autojen välille oletetaan lievät korrelaatiot $(0,1; 0,2; 0,3)$. Tällöin yhden ryhmän varianssi saadaan kaavalla 11, jonka jälkeen kokonaiskuorman hajonta voidaan laskea kaavan 9 avulla.

Kokonaiskuormasta lasketaan edelleen 99 % luottamustasoa vastaavat tehot vuorokauden tunneille kaavalla 7. Näistä arvoista voidaan hakea vuorokauden huipputeho. Tutkittaessa suhteellista kuormitusta tehot jaetaan muuntajan nimellisteholla. Muuntajille lasketaan myös muutamassa tapauksessa käyttökerroin, joka on vuorokauden keskitehon ja huipputehon suhde.

Asuinalueiden muuntajien osalta tutkitaan huipputehon suhdetta muuntajan nimel-

listehoon eri tilanteissa muuttamalla tiettyjä parametreja. Lisäksi tutkitaan muuttamalla esimerkiksi muuntajan kokonaiskuorman muodostumista sekä muuntajan käyttökerrointa. Muunneltavat parametrit ovat:

- Sähköautojen penetraatio (0 %, 10 %, 50 %, 100 %)
- Latauspaikat
 - Auto ladataan pelkästään kotona (kuvat 24 ja 25)
 - Auto ladataan töissä ja kotona (kuvat C3 ja C5)
 - Auto ladataan töissä, julkisessa pisteessä ja kotona (kuvat C4 ja C6)
- Latausteho (3,7 kW, 11 kW)

Toteuttamalla laskennat näin saadaan tietoja, miten:

- Sähköautojen penetraatio vaikuttaa muuntajien suhteelliseen huipputehoon
- Sähköautojen lataaminen kodin ulkopuolella vaikuttaa suhteelliseen huipputehoon
- Latauksen teho vaikuttaa muuntajien suhteelliseen huipputehoon
- Muuntajan asiakasryhmien jakauma vaikuttaa kokonaiskuormaan
- Sähköautojen lataaminen vaikuttaa muuntajan kuormituksen tasaisuuteen

Latausta palvelualueella ja työpaikka-alueilla tutkitaan samana ajankohtana kuin asuinalueita. Tutkittaessa sähköautojen päivärakenteet ja latauskäyttäytymiset ovat:

- Palvelualue
 - Autot lataavat julkisessa pisteessä ja kotona (kuva 26)
- Työpaikka-alueet
 - Kaikki autot käyvät vain töissä
 - Autot lataavat töissä ja kotona (kuva 27 kahden matkan käyrä)

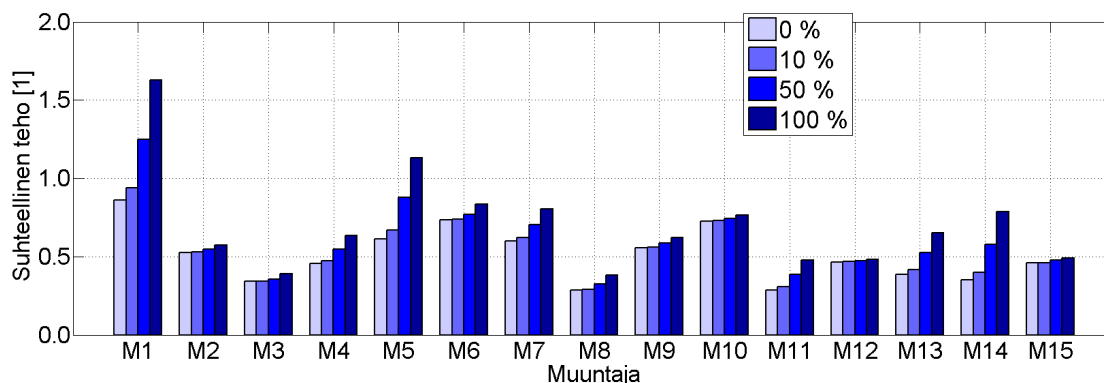
Nämä tapaukset tutkitaan vain 3,7 kW:n latausteholla, mutta kaikilla penetraatioilla. Penetraatio on siis ainoa varioitava parametri. Nyt tavoitteena on tutkia penetraation vaikutusta huipputehoon sekä muuntajan kokonaiskuorman muodostumista.

Lataamisen ohjaamista tutkitaan vain illalla tapahtuvassa kotilatauksessa, kun autolla saavutaan viimeisen kerran vuorokauden aikana kotiin. Tilanne vastaa muuten täysin aikaisemmin esitettyä asuinalueen tutkimista, mutta ainoastaan penetraatiota ja ohjattavien autojen osuutta varioidaan (ladataan vain kotona teholla 3,7 kW). Tutkittavat ohjausmenetelmät on käsitelty luvussa 7.4 ja käytettävät latauskäyrät kuvissa 28 ja 29. Tarkoitus on tutkia, kuinka ohjaaminen vaikuttaa muuntajan suhteelliseen huipputehoon ja käyttökertoimeen sekä havainnollistaa muuntajan kokonaiskuorman muodostumista.

8.4 Tulokset

8.4.1 Asuinalueet

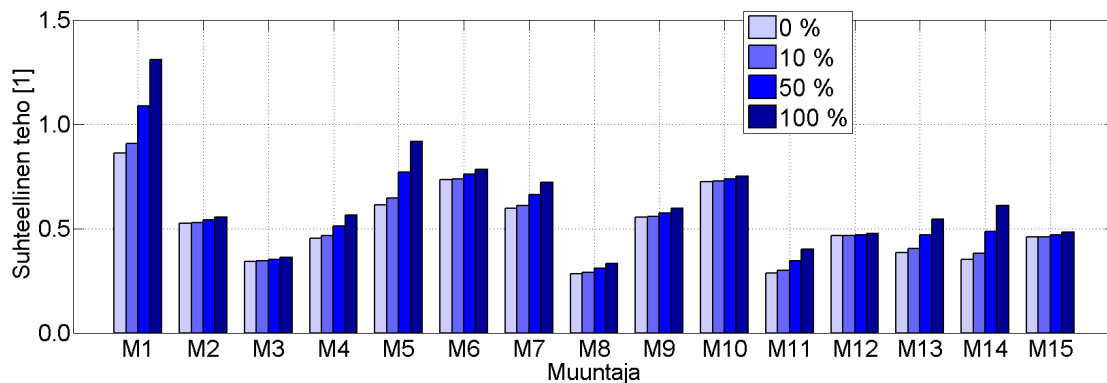
Kuvassa 32 on esitetty muuntajien M1 – M15 suhteelliset huipputehot (huipputehon ja muuntajan nimellistehon suhde) penetraation mukaan, kun autoa ladataan vain kotona 3,7 kW:n teholla. Nähdään, että 10 % penetraatiolla lataamisella ei ole juuri vaikutusta huipputehoon. Vasta 50 % ja 100 % penetraatiolla on joillain alueilla selvää vaikutusta. Alueet ovat pääasiassa rivi- ja kerrostaloalueita, joissa ladattavia autoja on paljon. Alueilla, joissa on suurimmaksi osaksi suoraa tai varaavaa sähkölämmitystä, lataamisella ei ole juurikaan vaikutusta huipputehoon. Vaikka lataamisella on vaikutusta, muuntajat eivät juuri ylikuormitu ainakaan tutkittuna vuorokautena.



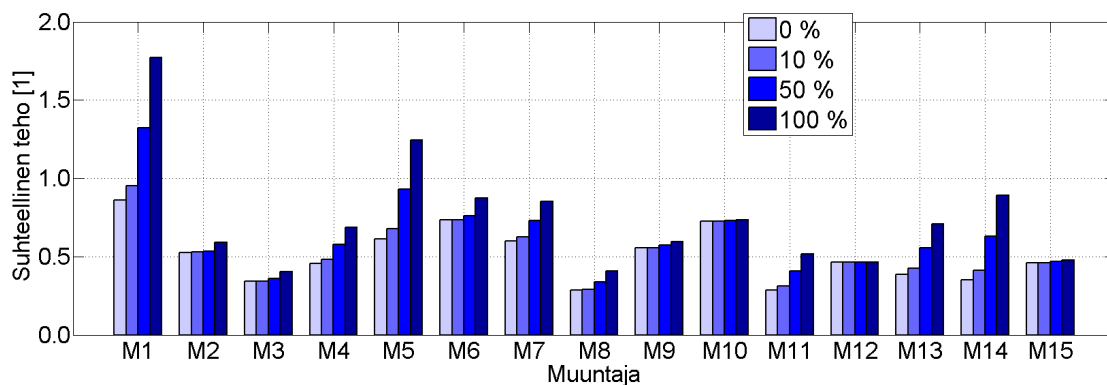
Kuva 32: Asuinalueiden jakelumuuntajien suhteellinen huipputeho, kun autoa ladataan vain kotona 3,7 kW:n teholla.

Kuva 33 vastaa kuvan 32 tilannetta, mutta nyt autoja voidaan ladata myös työpaikalla ja julkisessa latauspaikassa. Sähköauton lataaminen päivän aikana kodin ulkopuolella pienentää selvästi muuntajien huipputehoa tutkittuna vuorokautena. Liitteen D kuvassa D1 on esitetty vastaava tilanne, kun lataaminen on mahdollista työpaikalla ja kotona. Tässäkin tilanteessa huipputeho pienenee. Yksittäisen auton latauskäyrää esittävistä kuvista C3 ja C4 nähdään, että ladattaessa autoa kodin ulkopuolella latauksen huipputeho voi laskea jopa noin kolmanneksella.

Kuva 34 vastaa kuvan 32 tilannetta, mutta nyt autoja ladataan 11 kW:n teholla. Hitaaseen lataukseen verrattuna huipputehot kasvavat rivi- ja kerrostaloalueilla, mutta usealla varaavan sähkölämmityksen alueella huipputehot pienenevät. Muutokset ovat kuitenkin kaikilta osin pieniä hitaaseen lataukseen verrattuna. Liitteissä kuvissa D2 ja D3 on esitetty vastaava tilanne, kun voidaan ladata kodin lisäksi työpaikalla sekä työpaikalla ja julkisessa latauksessa 11 kW:n teholla. Lataus kodin ulkopuolella vähentää selvästi asuinalueiden muuntajien kuormitusta. Nytkin tilannetta vastaavien latauskäyrien kuvista C5 ja C6 nähdään, kuinka latauksen huipputeho laskee selvästi ladattaessa myös kodin ulkopuolella.



Kuva 33: Asuinalueiden jakelumuuntajien suhteellinen huipputeho, kun autoa voidaan ladata kodin lisäksi työpaikalla ja julkisessa latauksessa 3,7 kW:n teholla.



Kuva 34: Asuinalueiden jakelumuuntajien suhteellinen huipputeho, kun autoa ladataan vain kotona 11 kW:n teholla.

Liitteissä kuvissa D4 – D11 on havainnollistettu sähköautojen latauskäyrän summautumista muuntajan peruskuormaan. Esimerkkeinä on käytetty muuntajia M1, M6, M10 ja M13, joiden avulla voidaan havainnollistaa, kuinka erilaiset peruskuormat ja latauskäyrät vaikuttavat kokonaiskuormaan ja huipputehoon. Rivi- ja kerrostaloalueilla peruskuorma on suurimmillaan noin kello 16 – 21 välisenä aikana, jolloin myös kotilataus saavuttaa huipputehon. Jos taas alueella on paljon varaavaa sähkölämmitystä, kuorma on suurimmillaan noin kello 21:n jälkeen. Etenkin 11 kW:n latauksella latauskuorma on pienentynyt jo huomattavasti tähän mennessä, jolloin latauksella ei ole suurta vaikutusta huipputehoon.

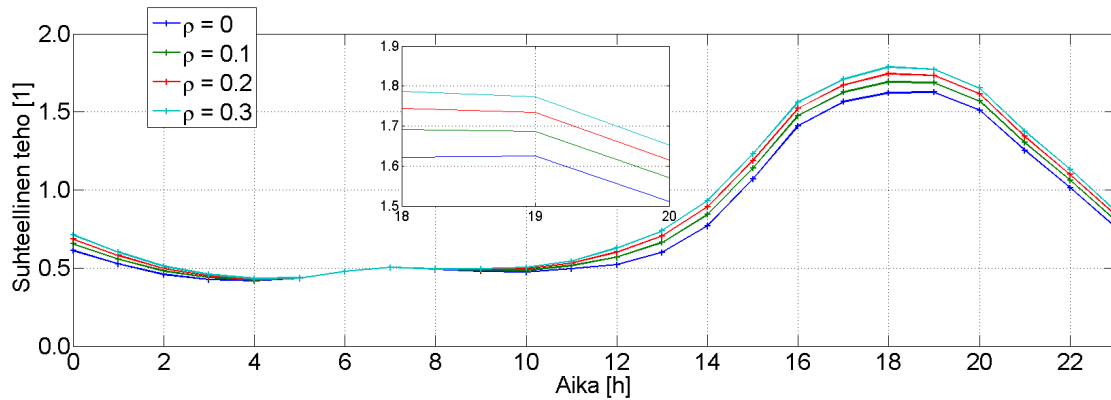
Kuvista D4 – D11 voidaan myös arvioida mahdollisen ylikuormituksen kestoa. Latausteho näyttää olevan suurimmillaan noin viisi tuntia hitaalla latauksella ja noin tunnin vähemmän puolinopealla latauksella. Latauksen mahdollisesti aiheuttama ylikuormitus kestää siis todennäköisesti joitain tunteja vuorokaudessa. Toisaalta tilanne riippuu oleellisesti, kuinka lähellä muuntajan kuormitus on ennestään sen nimellistehoa.

Taulukossa 8 on esitetty muuntajien käyttökertoimia kuvaa 32 vastaavassa tapauksessa. Taulukosta nähdään, että käyttökertoimissa ei ole suuria muutoksia 10 % ja 50 % penetraatioilla suurella osalla muuntajista, eli lataus ei vaikuta merkittävästi muuntajan kokonaiskuorman tasaisuuteen. M9:n käyttökertoimeen lataus ei vaikuta juuri ollenkaan ja esimerkiksi M12:sta se parantaa käyttökerrointa. Käyttökerroin vaikuttaa pienenevän merkittävimmin alueilla, joissa on pääasiassa muita kuin sähkölämmityksen eri muotoja.

Taulukko 8: Muuntajien käyttökertoimia sähköautopenetraation mukaan ladattaessa vain kotona 3,7 kW:n teholla.

	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12	M13	M14	M15
0 %	0,58	0,71	0,73	0,69	0,61	0,71	0,64	0,65	0,56	0,47	0,63	0,50	0,49	0,55	0,49
10 %	0,55	0,71	0,73	0,65	0,58	0,71	0,63	0,64	0,56	0,48	0,60	0,50	0,48	0,52	0,50
50 %	0,49	0,71	0,74	0,60	0,51	0,72	0,59	0,62	0,56	0,49	0,53	0,52	0,44	0,46	0,50
100 %	0,45	0,70	0,70	0,55	0,46	0,69	0,55	0,57	0,56	0,51	0,59	0,55	0,41	0,41	0,51

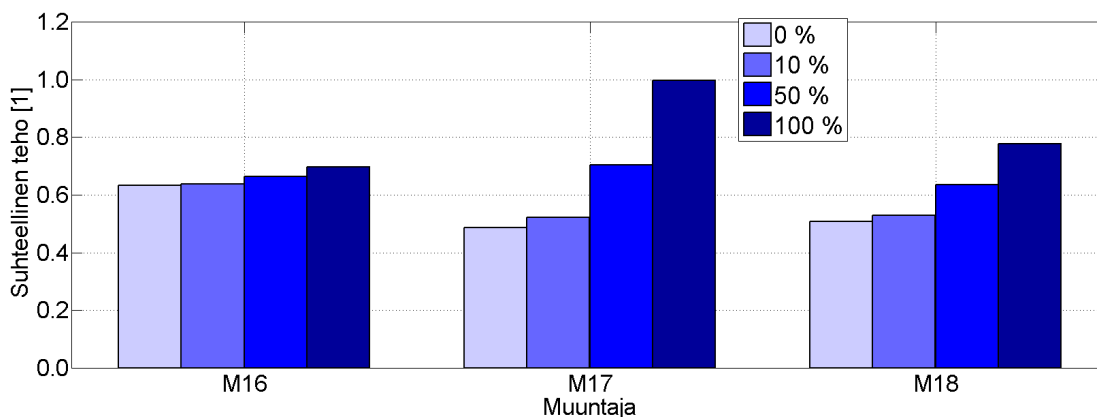
Kuvassa 35 on tutkittu latauksen ja peruskuorman välisen korrelaation ρ vaikutusta kokonaiskuormaan. Suurennetusta kuvasta nähdään, että vaikutus on kohtalainen. Lopputuloksen kannalta on siis merkitystä, oletetaanko latauskäyrät ja peruskuormat riippumattomaksi vai eivät. Käytännössä korrelaatiota on todennäköisesti latauskäyrän ja muun kuormituksen välillä esimerkiksi lämpötilan nostaessa keskimääräistä tehontarvetta. Korrelaatio saattaa olla myös negatiivinen. Esimerkiksi jouluaattona peruskuorma voi olla illalla keskimääräistä suurempi, mutta auton lataustarve normaalia pienempi.



Kuva 35: Lataamisen ja peruskuorman välisen korrelaation ρ vaikutus 99 %:n luottamusvälillä laskettuun tunneittaiseen tehoon.

8.4.2 Palvelualue ja työpaikka-alueet

Kuvassa 36 on esitetty muuntajien M16 – M18 suhteelliset huipputehot penetraation mukaan, kun autoa ladataan julkisessa latauspisteessä (M16) tai työpaikalla (M17 ja M18) ja kotona 3,7 kW:n teholla. Jälleen 10 % penetraatiolla latauksen vaikutus ei ole merkittävä, mutta vaikutus lisääntyy penetraation mukana. Vaikutus on merkittävä etenkin muuntajilla M17 ja M18, joiden muuntopiirissä on paljon parkkipaikkoja. Lisäksi työpaikka-alueilla latauskuorma on palvelualueiden latauskuormaa huipukkaampaa.



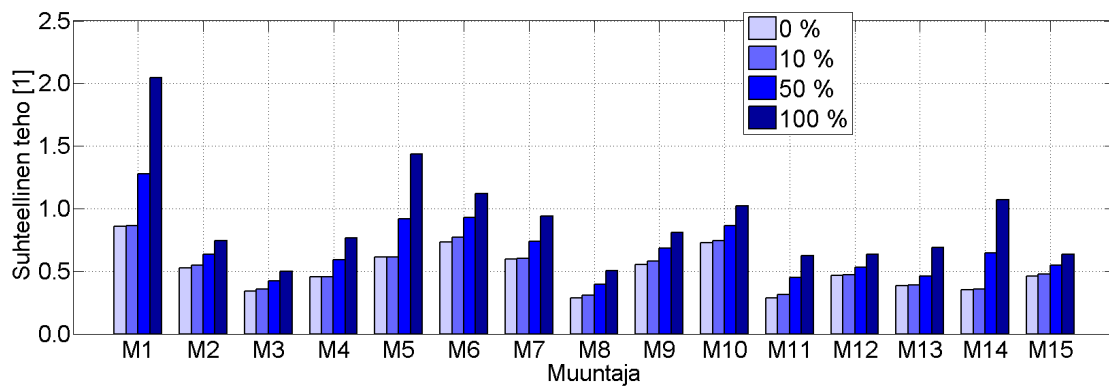
Kuva 36: Palvelualueen ja työpaikka-alueiden jakelumuuntajien suhteelliset huipputehot penetraation mukaan, kun autoa voidaan ladata julkisessa latauksessa (M16) ja työpaikalla (M17 ja M18) 3,7 kW:n teholla.

Liitteessä E on tutkittu sähköautojen latauskäyrän summautumista muuntajan peruskuormaan. Summautumista on tutkittu 3,7 kW:n latausteholla ja 100 % penetraatiolla. Palvelualueella (kuva E1) latauksen huippu osuu hetkeen, jolloin peruskuorma alkaa pienentyä. Latauksella on kuitenkin selvä vaikutus kokonaiskuorman huipputehoon. Palvelualueella voi olla kauppojen lisäksi normaaleja päivätyöpaikkoja tai aikaisin kiinni meneviä liikkeitä, jolloin peruskuorman huipputeho saatetaan saavuttaa ennen latauskuorman huipputehoa. Latauskuorman huippu vaikuttaa osuvan alkuiltaan, jolloin töistä tulevat autot käyvät vapaa-ajan ajossa.

Työpaikka-alueilla (kuvat E2 ja E3) peruskuorma alkaa kasvaa viiveellä latauskuormaan verrattuna. Tämä voi johtua palvelu- ja hallintorakennusten muodostamasta kuormasta, sillä palvelu- ja hallintoalan työpaikkoihin saatetaan saapua keskimääräistä myöhemmin. Lataus vaikuttaa silti huipputehoon, vaikka mallin tuottaman latauskäyrän huippu ei osukaan täysin kohdalle.

8.4.3 Latauksen ohjaaminen

Kuvassa 37 on tutkittu lataamisen viivästämisen vaikutusta muuntajan suhteelliseen huipputehoon. Kaikkien autojen latausta ohjataan, ja niitä ladataan vain kotona 3,7 kW:n teholla. Tilanne on siis sama kuin ilman ohjausta kuvassa 32. Ohjaus näyttää kasvattavan huipputehoja etenkin sähkölämmitysalueilla sekä 100 % penetraatiolla verrattuna tilanteeseen ilman ohjausta. 10 % penetraatiolla ohjauksella näyttää kuitenkin olevan suotuista vaikutus rivi- ja kerrostaloalueilla. Kuvassa F1 on esitetty vastaava tilanne, mutta vain kolme matkaa vuorokaudessa ajavia autoja ohjataan. Samat ilmiöt on havaittavissa kuin kaikkia autoja ohjattaessa, mutta rivi- ja kerrostaloalueilla 100 % penetraatiolla huipputehot saattavat laskea verrattuna ohjaamattomaan lataamiseen.

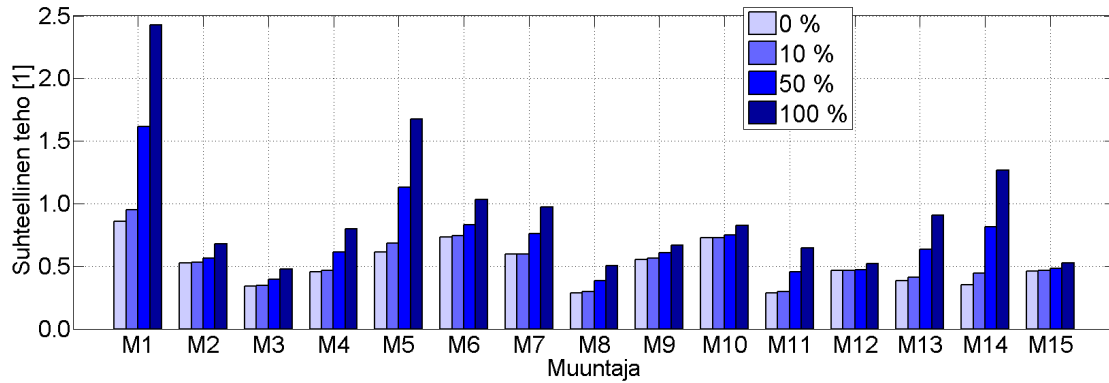


Kuva 37: Asuinalueiden jakelumuuntajien suhteellinen huipputeho ohjattaessa latausta viivästetyllä ohjauksella, kun autoa ladataan vain kotona 3,7 kW:n teholla.

Kuva 38 esittää tilannetta, jossa kaikkien autojen latausta ohjataan sähkön hinnan mukaan. Muuten tilanne vastaa viivästämisen yhteydessä tutkittua tilannetta. 10 % penetraatiolla ohjaus ei juuri vaikuta huipputehoon, mutta tätä suuremmilla penetraatioilla ohjaus kasvattaa huipputehoa. Kuvassa F2 on esitetty vastaava tilanne, mutta vain kolme matkaa vuorokaudessa ajavia autoja ohjataan. Vaikutukset huipputehoon ovat samanlaiset kuin kaikkia autoja ohjattaessa, mutta lievemmät.

Liitteissä kuvissa F3 – F10 on esitetty latauskäyrien summautumista muuntajien M3 ja M14 peruskuormaan 50 % penetraatiolla, kun kaikkia autoja tai vain vuorokauden aikana kolme matkaa ajavia autoja ohjataan. Kuvista F3, F4, F7 ja F8 nähdään, kuinka ohjaus siirtää latauskuormaa suuren peruskuorman tunneille. Kuvista F5, F6, F9 ja F10 taas nähdään, kuinka ohjaus siirtää latauskuormaa pois suuren peruskuorman tunneilta. Jälkimmäisissä tapauksissa ohjaus toimii siis toivotulla tavalla. Hintaohjauksen tapauksessa nähdään kaikissa kuvissa latauksen kytkeytyessä takaisin päälle huomattava tehopiikki, joka näkyy myös kokonaiskuormassa.

Taulukot 9 ja 10 sisältävät muuntajien käyttökertoimia sähköautopenetraation mukaan, kun hidasta kotilatausta ohjataan viivästetyllä ohjauksella tai hintaohjauksella. 10 % penetraatiolla käyttökertoimissa ei ole juuri eroa verrattaessa taulukkoon



Kuva 38: Asuinalueiden jakelumuuntajien suhteellinen huipputeho ohjattaessa latausta sähkön hinnan mukaan, kun autoa ladataan vain kotona 3,7 kW:n teholla.

8. Kuitenkin alueilla, joissa on pääasiassa muita kuin sähkölämmityksen eri muotoja, käyttökertoimet näyttävät hieman kasvavan. Yli 10 % penetraatioilla käyttökertoimet huononevat kummallakin ohjauksella verrattuna taulukkoon 8. Ohjauksia vertailtaessa usealla osittain varaavan sähkölämmityksen alueella hintaohjaus parantaa käyttökerrointa verrattuna viivästettyyn ohjaukseen. Jälleen ohjauksesta saatava hyöty riippuu pitkälti peruskuormasta sekä ohjauksen aiheuttamasta tehopiikistä.

Taulukko 9: Muuntajien käyttökertoimia sähköautopenetraation mukaan ladattaessa vain kotona 3,7 kW:n teholla viivästetyllä ohjauksella.

	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12	M13	M14	M15
0 %	0,58	0,71	0,73	0,69	0,61	0,71	0,64	0,65	0,56	0,47	0,63	0,50	0,49	0,55	0,49
10 %	0,60	0,68	0,71	0,68	0,63	0,68	0,65	0,61	0,54	0,47	0,59	0,50	0,51	0,58	0,48
50 %	0,48	0,61	0,62	0,55	0,49	0,72	0,59	0,56	0,51	0,48	0,42	0,46	0,50	0,40	0,43
100 %	0,36	0,54	0,55	0,46	0,37	0,52	0,47	0,43	0,43	0,38	0,37	0,41	0,38	0,30	0,39

Taulukko 10: Muuntajien käyttökertoimia sähköautopenetraation mukaan ladattaessa vain kotona 3,7 kW:n teholla hintaohjauksella.

	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12	M13	M14	M15
0 %	0,58	0,71	0,73	0,69	0,61	0,71	0,64	0,65	0,56	0,47	0,63	0,50	0,49	0,55	0,49
10 %	0,55	0,70	0,73	0,66	0,56	0,71	0,65	0,63	0,55	0,47	0,62	0,50	0,49	0,47	0,49
50 %	0,38	0,68	0,66	0,53	0,40	0,66	0,54	0,52	0,54	0,49	0,45	0,52	0,38	0,32	0,49
100 %	0,30	0,59	0,57	0,44	0,31	0,56	0,45	0,43	0,52	0,47	0,35	0,50	0,29	0,25	0,48

9 Johtopäätökset

Tässä luvussa tuodaan esille ja pohditaan sähköautojen lataamisen mallintamisessa ja jakelumuintajien kuormituksen tutkimisessa saatuja keskeisiä tuloksia. Lisäksi arvioidaan tehtyjen oletusten vaikutuksia. Liikkeelle lähdetään latauskäyrien luotettavuudesta ja sitä kautta edetään latauskäyrien avulla tehtyihin kuormitustutkimuksiin.

Sähköautojen latauskäyriä on esitetty luvussa 7.7 sekä liitteessä C ja osaltaan arvioitu jo luvuissa 7.6 ja 7.7. Lähtötietoihin ja muihin tutkimuksiin verrattuna saadut latauskäyrät vaikuttavat käyttökelpoisilta. Simulointimalli kykenee tuottamaan latauskäyriä useilla eri lähtöparametreilla, ja parametrien muuttaminen näyttää vaikuttavaan tuloksiin teorian mukaisella tavalla.

Saatujen tulosten perusteella vaikuttaa, että latausajat ovat melko lyhyitä toisin kuin yleensä ajatellaan. Esimerkiksi kuvassa 24 vuorokaudessa ladattu energia ajettujen matkojen määrästä riippuen vaihtelee välillä 5 – 10 kWh. Tällöin hitaalla latauksellakin akustot täyttyvät keskimäärin 1,5 – 4 tunnissa. Todellisuudessa tulee huomioida, että lataus ei tapahdu vakioteholla, mikä pidentää latausaikaa. Lisäksi mallin antamat keskimääräiset matkasuoritteet voivat olla todellista pienemmät ja todellinen latausteho voi olla alle 3,7 kW auton tai verkon rajoituksista johtuen. Tulosten perusteella valtaosa autoista on kuitenkin ladannut kello 02 mennessä ja liikkeelle lähdetään aamulla kello 06 – 08. Latauksen pidentymiseen jää siis huomattavasti aikaa.

Tässä työssä lähtötietona käytetty matkanpituusjakauma huomioi vain 100 km pitkät ja sitä lyhyemmät matkat. Tämän takia autojen keskimääräiset päiväsuoritteet jäävät lyhyemmiksi kuin ne tilastojen mukaan ovat, jolloin myös akustoihin vuorokaudessa ladattu energia pienenee. Haluttaessa verkosta otettavaa energiaa voidaan lisätä pienentämällä latauksen hyötysuhdetta, mikä ei kuitenkaan tee tuloksista yhtään enempää totuuden mukaisia. Toisaalta myös akuston koko ja auton kulutus vaikuttavat keskimääräiseen päiväsuoritteeseen ja edelleen ladattavaan energiaan. Tämä johtuu ohjelman toiminnasta, sillä arvottavat matkojen pituudet lyhenevät, jos niitä ei voida ajaa jäljellä olevalla varauksella. On myös mahdollista, että todellisuudessaakin sähköautoilla ajetaan luonnostaan lyhyempiä matkoja auton kantaman riittämättömyyden pelossa.

Latauskäyttäytymisen ja ladattavan energian vuodenaikavaihteluihin liittyen tietoa on saatavilla vielä liian vähän. Tutkittaessa sähköautojen latausta kylminä vuodenaikoina olisi hyödyllistä tietää latauksen hyötysuhteelle ja auton kulutukselle jokin lämpötilariippuvuus. Todennäköisesti kylmissä oloissa latausajat pitenevät ja ladattavat energiat kasvavat. Tällä voi olla käytännössä merkitystä, jos sähköautojen lataus tullaan huomioimaan osana verkon kuormituksen ennustamista. Latauksella olisi epäsuotuisa korrelaatio verkon peruskuorman kanssa senkin kasvaessa kylmällä. Lisäksi mahdolliselle ohjaukselle saattaa tulla rajoitteita kylmällä, jos akustoa on pidettävä lämpimänä ladattaessa tai jos latausajat kasvavat lämmitystarpeen ja

kasvaneen kulutuksen takia liian pitkiksi.

Jakelumuuntajien kuormituksia tutkittaessa huomattiin, että lataamisen vaikutus kuormitukseen riippuu paljon muuntajan muuntopiirin asiakastyypeistä. Kaikista haitallisista vaikutuksista latauksella on asuinalueella, jossa ei juuri ole sähkölämmityksen eri muotoja. Tällöin muuntajan peruskuorman huippu ja latauskuorma ajoittuvat tyypillisesti iltatunneille. Varaavan sähkölämmityksen ollessa peruskuormaa dominoiva hitaalla tai puolinopealla latauksella vaikuttaa olevan muuntajan kuormitusta tasoittava vaikutus. Toisaalta lähes kaikissa tutkituissa tapauksissa nähtiin, että muuntajan ylikuormittumisen vaara latauksen vaikutuksesta on hyvin pieni jopa suurehkoilla sähköautojen määrillä.

Vasta verkkoon asennetuilla muuntajilla peruskuorma huipputeho vaikuttaisi olevan selvästi alle puolet nimellistehosta. Verkossa jo noin 30 vuotta olleilla muuntajilla peruskuorman huipputeho on noin puolet nimellistehosta tai yli puolet nimellistehosta riippuen muuntajasta. Asuinalueiden muuntajien peruskuorma ei siis välttämättä saavuta nimellistehoa kaupunkialueilla. Tämä voi johtua muuntajien mitoittamisesta varasyöttöjä varten, jolloin niiden kapasiteetti on normaalitilanteeseen selvästi ylimitoitettu. Sähköautot on siis tulevaisuudessa syytä huomioida jakelumuuntajien mitoituksessa, vaikka ne eivät muuntajia suoraan ylikuormittaisikaan. Esimerkiksi muuntajat M3, M8, M9, M11, M13, M14, M17 ja M20 ovat todennäköisesti vielä toiminnassa 2030-luvulla, jolloin sähköautojen penetraatio voi olla 10 – 50 %. Osassa näistä muuntajista latauksella on selvä vaikutus huipputehoon jo kyseisillä penetraatioilla. Sähköautojen latauksen merkitys voi myös kasvaa asuntojen lämmitystapojen mahdollisesti muuttuessa esimerkiksi kaukolämmön yleistyessä ja suoran sähkölämmityksen vähentyessä.

Lataus kodin ulkopuolella vaikuttaa tulosten perusteella olevan useallakin tapaa hyödyllistä. Ensinnäkin työpäivät ovat niin pitkiä, että usein akusto saadaan ladattua täyteen päivän aikana. Toiseksi lataukselle saadaan hajontaa päivän yli, mikä suuressa mittakaavassa tarkasteltuna tasoittaa verkon kuormitusta. Lisäksi kotona latausajat lyhentyvät, mikä helpottaa latauksen ohjaamista viivästyksen ja porrastuksen saadessa enemmän aikaa. Toisaalta jo lyhyehköt lataukset julkisissa latauspisteissä todennäköisesti rohkaisevat kuljettajia sähköauton käyttöön päivittäisenä kulkuvälineenä.

Palvelualueella ja työpaikka-alueilla lataus vaikuttaa melko suoraan muuntajien huipputehoon. Työpaikka-alueella peruskuorman ja latauksen välillä on selvä riippuvuus, eli peruskuorma kasvaa, kun ihmiset menevät töihin. Palvelualueella näin selvää riippuvuutta ei ole. Peruskuorma kasvaa jo selvästi ennen kuin suurin osa lataavista autoista saapuu alueelle. Peruskuorma riippuu siis enemmän alueelle menevistä työntekijöistä kuin asiakkaista.

Palvelualueilla ja työpaikka-alueilla parkkipaikkoja voi olla paljon. Lisäksi nämä alueet vaikuttavat todennäköisiltä latauspaikoilta sähköautoille. Sähköautojen lataus voi siis olla tarpeen huomioida alueen verkkoa suunniteltaessa. Latauspaikkojen määrä voi silti jäädä pieneksi parkkialueilla, jolloin alueella ladattavien sähkö-

autojen suuret penetraatiot ovat todella pessimistisiä. Tulee kuitenkin huomioida, että julkisilla parkkialueilla latauksen hajonta vuorokauden aikana voi olla pientä. Esimerkiksi tapahtumien alkamisajat voivat aiheuttaa alueella usean auton yhtäaikaista lataamista.

Peruskuorman luonteella on selvä merkitys lataamisen ohjauksen tärkeydessä. Eissähkölämmittetyillä alueilla ohjauksella saadaan siirrettyä latauskuormaa pois suuren peruskuorman tunneilta. Tällöin tulee kuitenkin kiinnittää huomiota latauksen uudelleen aloittamiseen. Jos samaa ohjausta käyttäviä autoja on useita, porrastamattomassa aloittamisessa verkkoon syntyy selvä tehopiikki. Tehopiikin vaara on etenkin ohjattaessa sähkönn hinnan mukaan, jolloin sama hintasignaali ohjaa todennäköisesti useita tai jopa kaikkia kyseisen ohjauksen piiriin kuuluvia. Tehopiikillä voi olla huomattavakin vaikutus sähkönn laatuun ja verkostokomponenttien kuormittumiseen. Tilanne on ongelmallinen, sillä usean auton yhtäaikainen lataus saattaa päällekytkentöjen jälkeen kestää vielä tunteja, jolloin porrastuksen tulisi tapahtua riittävän pitkällä aikavälillä. Tämä ei käytännössä kuitenkaan ole todennäköisesti toivottua lataajan asemassa. Viivästetyssä ohjauksessa varsinaista tehopiikkiä ei todennäköisesti ole, jos päällekytkennät on porrastettu tai lataajat voivat valita viivästyksen satunnaisesti. Tällöinkin useaa latausta ohjattaessa lataustehon hajonta pienenee selvästi verrattuna ohjaamattomaan lataukseen, mikä näkyy voimakkaana kuormituksena.

Tulosten perusteella vaikuttaisi, että ohjauksesta on hyötyä ainakin joillakin alueilla. Joillain alueilla voi taas olla suotuisaa ladata akustot täyteen nopeasti viimeisen kotiin saapumisen jälkeen. Muuntajien kannalta latauksen viivästystä tai tauottamista oleellisempaa vaikuttaa olevan latauksen päällekytkentä ohjauksessa. Yön yli tapahtuvassa latauksessa aikaa lataukselle vaikuttaa olevan suurella osalla lataajista hyvin, joten porrastamiseen on mahdollisuus. Toisaalta hintaohjauksessa myös lataustauon pituudella on merkitystä. Ohjauksen käyttämä hintasignaali ei todennäköisesti seuraa tarkasti yhdenkään jakelumuuntajan peruskuormaa. Tällöin on olemassa vaara, että ohjaus kyllä katkaisee latauksen peruskuorman kasvaessa, mutta kytkee sen takaisin peruskuorman vielä ollessa korkealla. Tällainen tilanne on esimerkiksi kuvassa F9.

Kaikkiin saatuihin tuloksiin on syytä suhtautua varauksella, sillä käytännön kokemuksia sähköautoista ei juuri vielä ole. Tässä työssä toteutetut simuloinnit ja laskennat on tehty nykyisten sähköautojen teknisiä ominaisuuksia hyödyntäen, mikä voi olla huono oletus tutkittaessa 10 % penetraatiotakin. Sähköautojen suurena esteenä pidetään riittämätöntä kantamaa, joka johtuu akkuteknologian kehittymättömyydestä ja toisaalta auton kulutuksesta. Jos kuitenkin sähköautot alkavat yleistyä, nämä ongelmat on todennäköisesti voitettu. Tehdyillä teknologiaparannuksilla on todennäköisesti jonkinlainen vaikutus latauskäyttäytymiseen esimerkiksi energiankulutuksen pienentyessä. Toisaalta autoa ei välttämättä tarvitse enää ladata joka päivä.

10 Yhteenveto

Tässä työssä muodostettiin simulointimalli, jolla voidaan tutkia sähköauton lataamista vuorokauden aikana. Simulointimallilla saadaan tuntikeskitehot ja keskihajonnat vuorokauden jokaiselle tunnille erilaisille sähköauto- ja käyttäjätyypeille. Mallilla muodostettujen latauskäyrien avulla tutkittiin useiden todellisten jakelumuuntajien kuormittumista sähköautojen eri penetraatioilla ja latauskäyttäytymisillä.

Toteutettu simulointimalli perustuu Monte Carlo -menetelmään. Lähtötietoina käytettiin pääasiassa Valtakunnallisen henkilöliikennetutkimuksen tuloksia, joista saadaan tietoa ihmisten päivittäisestä liikkumisesta. Muut tarvittavat lähtötiedot liittyvät sähköautojen nykyisiin teknisiin ominaisuuksiin, kuten akuston kokoon ja kulutukseen. Nämä tiedot arvioitiin muiden tutkimusten pohjalta sekä kaupallisten sähköautojen valmistajien ilmoittamista ominaisuuksista. Lataustehojen määrittämisessä hyödynnettiin nykyisiä ohjeistuksia sekä standardeja.

Työssä tehtiin lisäksi kirjallisuuskatsaus latauksen ohjausmenetelmiin sekä verkostovaikutuksiin. Tässä työssä päädyttiin ohjausmenetelmistä tutkimaan latauksen viivästämistä sekä ohjausta sähkönn hinnan mukaan. Katsaus latauksen verkkovaikutuksiin toi esille, että sähköautojen lataamisella voi olla heikentävä vaikutus sähkönn laatuun ja että lataus voi ylikuormittaa komponentteja.

Toteutettu simulointimalli vaikuttaa tuottavan mielekkäitä latauskäyriä, jotka muuttuvat odotetulla tavalla lähtöparametreja muutettaessa. Latauskäyrät ovat kuitenkin järkevästi hyödynnettävissä vasta, kun tutkitaan usean saman tyyppin latausta. Tämä johtuu siitä, että tuntikeskitehot ovat keskimääräisiä arvoja, jotka lasketaan kaksihuippuisesta jakaumasta. Tällöin keskiarvo ei kuvaa mitään mahdollista lataustehoa. Saatuja arvoja voidaan kuitenkin summata keskenään, jolloin keskiarvosta tulee normaalijakautunut.

Jakelumuuntajien kuormittumista tutkittaessa saatiin useita huomion arvoisia tuloksia. Jakelumuuntajan peruskuormalla eli siis myös sen käyttäjäryhmien jakaumalla vaikutti olevan oleellinen merkitys latauksen vaikutuksiin. Alueilla, joissa on vähän mitään sähkölämmityksen muotoja, sähköautojen lataus näkyi suoraan huipputehossa. Etenkin varaavan sähkölämmityksen alueella lataamisella ei ollut juuri mitään vaikutusta huipputehoon. Lataamista ohjattaessa vaikutukset olivat juuri päinvastoin. Lataamiseen ohjaamisen osalta huomattiin myös, että latauksien ohjaaminen päälle voi aiheuttaa huomattavan tehopiikin muuntajalle. Tämän takia porrastettua päällekytkentää tulee harkita.

Viitteet

- [1] U.S. Energy Information Administration (EIA). *International Energy Outlook 2011*. U.S. Energy Information Administration, Washington, DC, 2011. 292 s.
- [2] International Energy Agency (IEA). *Energy Technology Perspectives 2010 – Scenarios & Strategies to 2050*. International Energy Agency, Paris, 2010. 650 s. ISBN: 978-92-64-08597-8.
- [3] Nylund, N. Liikenne- ja viestintäministeriö. 2011. Sähköautojen tulevaisuus Suomessa. Sähköautot liikenne- ja ilmastopolitiikan näkökulmasta. Saatavissa: http://www.lvm.fi/c/document_library/get_file?folderId=1551284&name=DLFE-11701.pdf&title=Julkaisu%2012-2011. Viitattu: 19.6.2012.
- [4] International Energy Agency (IEA). *Technology Roadmap – Electric and plug-in hybrid electric vehicles*. International Energy Agency, Paris, 2011. 52 s.
- [5] Liikennevirasto. Henkilöliikennetutkimus 2010-2011.
- [6] Oy Swot Consulting Finland Ltd. Tekes. 2010. Hypätään kyytiin – keskitämällä tuloksia. Saatavissa: www.tekes.fi/u/sahkoajoneuvoselvitys.pdf. Viitattu: 11.6.2012.
- [7] Biomeri Oy. Työ- ja elinkeinoministeriö. 2009. Sähköajoneuvot Suomessa – selvitys. Saatavissa: http://www.tem.fi/files/24099/Sahkoajoneuvot_Suomessa-selvitys.pdf. Viitattu: 11.6.2012.
- [8] Tilastokeskus. Suomen virallinen tilasto (SVT): Moottoriajoneuvokanta [verkojulkaisu]. ISSN=1798-856X. 2011. Saantitapa: http://www.stat.fi/til/mkan/2011/mkan_2011_2012-02-24_tie_001_fi.html. Viitattu: 11.6.2012.
- [9] Opel 2012. Opel Ampera. Saantitapa: <http://www.opel.fi/vehicles/opel-valikoima/autot/ampera/index.html>. Viitattu: 15.6.2012.
- [10] Toyota Auto Finland Oy. Toyota Prius PHEV. Saantitapa: http://www.toyota.fi/cars/coming-soon/prius_plugin/index.tmex. Viitattu: 15.6.2012.
- [11] Renault 2012. Zoe Preview. Saantitapa: <http://www.renault.com/en/innovation/l-univers-du-design/pages/show-car-zoe-preview.aspx>. Viitattu: 15.6.2012.
- [12] Citroën. Citroën C-Zero sähköauto tekniset tiedot ja vakiovarusteet. Saantitapa: http://www.citroen.fi/Resources/Content/FI/Technical_data/czero_tekniset.pdf. Viitattu: 15.6.2012.
- [13] Nissan Nordic Europe Oy. Nissan Leaf. Saantitapa: <http://www.nissan.fi/FI/fi/vehicles/electric-vehicles/electric-leaf/leaf.html#vehicles/electric-vehicles/electric-leaf/leaf>. Viitattu: 15.6.2012.

- [14] Green Car Congress. 2012. Renault features production version of ZOE, Twizy EV at Geneva. Saantitapa: <http://www.greencarcongress.com/2012/03/zoe-20120309.html>. Viitattu: 15.6.2012.
- [15] Laurikko, J. ja Erkkilä, K. 2010. Assessment of the energy efficiency of the propulsion system in an electric vehicle: Methodology and first results. Proceedings of EVS25. Electric Vehicle Association of Asia-Pacific EVAAP; China Electro-technical Society CES; Society of Automotive Engineers of China SAE-China. 25th World Electric Vehicle Symposium and Exposition, EVS25, Shenzhen, China, November 5 - 9, 2010.
- [16] Nieminen, J. 2012. TM koeajo: Nissan Leaf. *Tekniikan Maaailma*. 22.5.2012. Saantitapa: <http://tekniikanmaailma.fi/autot/koeajot/tm-koeajo-nissan-leaf>. Viitattu: 18.6.2012. Tiivistelmä TM:n 10/12 artikkelista, s. 122-127.
- [17] Pentti, O. Ampeerin paluu, testissä Nissan Leaf. *Tuulilasi*, 4.1.1012. Nro. 1/12, 100 s. Helsinki. A-lehdet Oy. ISSN 0041-4468.
- [18] Ketonen, T. Pieni ekoteko, testissä Citroën C-Zero. *Tuulilasi*, 8.6.2011. Nro. 8/11, 108 s. Helsinki. A-lehdet Oy. ISSN 0041-4468.
- [19] Turkula, T. Sähköauton ajomatka lyhenee pakkasessa jopa puoleen. *Helsingin Sanomat*. 10.1.2011 kello 11:37. Saantitapa: <http://www.hs.fi/autot/artikkeli/-/1135262942517?context=oikotie>. Viitattu: 18.6.2012.
- [20] Kyyrä, J. Hakkuriteholähteet, 2011. Kurssimateriaali. 213 s.
- [21] Huiping, Y., Lei, X., Shibin, M. ja Zhifu, W. The study of the on-board charger with the bridgeless PFC. Teoksessa *Power Electronics Systems and Applications (PESA), 2011 4th International Conference on*, ss. 1 – 3. june 2011. doi:10.1109/PESA.2011.5982970.
- [22] Chae, H.J., Kim, W.Y., Yun, S.Y., Jeong, Y.S., Lee, J.Y. ja Moon, H.T. 3.3 kW on board charger for electric vehicle. Teoksessa *Power Electronics and ECCE Asia (ICPE ECCE), 2011 IEEE 8th International Conference on*, ss. 2717 – 2719. 30 2011-june 3 2011. ISSN 2150-6078. doi:10.1109/ICPE.2011.5944762.
- [23] Ipakchi, A. ja Albuyeh, F. Grid of the future. *Power and Energy Magazine, IEEE*, 7(2):52 –62, march-april 2009. ISSN 1540-7977. doi:10.1109/MPE.2008.931384.
- [24] Erb, D.C., Onar, O.C. ja Khaligh, A. Bi-directional charging topologies for plug-in hybrid electric vehicles. Teoksessa *Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2010 Twenty-Fifth Annual IEEE*, ss. 2066 – 2072. feb. 2010. ISSN 1048-2334. doi:10.1109/APEC.2010.5433520.
- [25] Zhou, X., Wang, G., Lukic, S., Bhattacharya, S. ja Huang, A. Multi-function bi-directional battery charger for plug-in hybrid electric vehicle application. Teok-

- nessa *Energy Conversion Congress and Exposition, 2009. ECCE 2009. IEEE*, ss. 3930 – 3936. sept. 2009. doi:10.1109/ECCE.2009.5316226.
- [26] Burke, A. Batteries and ultracapacitors for electric, hybrid, and fuel cell vehicles. *Proceedings of the IEEE*, 95(4):806 – 820, april 2007. ISSN 0018-9219. doi:10.1109/JPROC.2007.892490.
 - [27] den Bossche, P. V., Vergels, F., Mierlo, J. V., Matheys, J. ja Autenboer, W. V. Subat: An assessment of sustainable battery technology. *Journal of Power Sources*, 162(2):913 – 919, 2006. ISSN 0378-7753. doi:10.1016/j.jpowsour.2005.07.039.
 - [28] Cairns, E. J. ja Albertus, P. Batteries for electric and hybrid-electric vehicles. *Annual Review of Chemical and Biomolecular Engineering*, 1(1):299–320, 2010. doi:10.1146/annurev-chembioeng-073009-100942.
 - [29] Davide, A. *Battery Management Systems for Large Lithium Ion Battery Packs*. Artech House, Norwood, MA, USA, 2010. 302 s. ISBN 9781608071050 (sähköinen). ISBN 9781608071043 (painettu).
 - [30] Elias, M.F.M., Nor, K.M., Rahim, N.A. ja Arof, A.K. Lithium-ion battery charger for high energy application. Teoksessa *Power Engineering Conference, 2003. PECon 2003. Proceedings. National*, ss. 283 – 288. dec. 2003. doi:10.1109/PECON.2003.1437458.
 - [31] Kang, T., Kim, C., Suh, Y., Park, H., Kang, B. ja Kim, D. A design and control of bi-directional non-isolated dc-dc converter for rapid electric vehicle charging system. Teoksessa *Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2012 Twenty-Seventh Annual IEEE*, ss. 14 – 21. feb. 2012. doi:10.1109/APEC.2012.6165792.
 - [32] Elias, M.F.M., Nor, K.M. ja Arof, A.K. Design of smart charger for series lithium-ion batteries. Teoksessa *Power Electronics and Drives Systems, 2005. PEDS 2005. International Conference on*, osa 2, ss. 1485 – 1490. 2005. doi:10.1109/PEDS.2005.1619923.
 - [33] Madrid, C., Argueta, J. ja Smith, J. Performance characterization – 1999 Nissan Altra – EV with lithium-ion battery. Tekninen raportti, Southern California EDISON, 1999.
 - [34] Kularatna, N. Rechargeable batteries and their management. *Instrumentation Measurement Magazine, IEEE*, 14(2):20 – 33, april 2011. ISSN 1094-6969. doi:10.1109/MIM.2011.5735252.
 - [35] Jiayuan, W., Zechang, S. ja Xuezhe, W. Performance and characteristic research in LiFePO₄ battery for electric vehicle applications. Teoksessa *Vehicle Power and Propulsion Conference, 2009. VPPC '09. IEEE*, ss. 1657 – 1661. sept. 2009. doi:10.1109/VPPC.2009.5289664.

- [36] Group, Focus and Electro-mobility, European and Mandate, Commission. Sähköajoneuvojen lataaminen kiinteistöjen sähköverkoissa. Saatavissa: http://www.sesko.fi/attachments/sahkoautot/seskoesite_sa_latausjarjestelmat_tammi_2012_aukeamat.pdf, 2009. Viitattu: 19.6.2012.
- [37] Työ- ja elinkeinoministeriö. 2010. Sähköajoneuvot Suomessa - työryhmämietintö. Saatavissa: <http://www.tem.fi/index.phtml?C=97986&s=2686&xmid=4313>. Viitattu: 12.6.2012.
- [38] Lehtinen, J. *Electric Vehicle Charging Systems in the Helsinki Region*. Diplomityö, Aalto-yliopisto, Espoo, 2010. 85 s.
- [39] European Automobile Manufacturers Association (ACEA). 2010. Acea position on the standardisation of the charging of electrically chargeable vehicles. Saantitapa: http://www.acea.be/images/uploads/files/20100630_Standardisation_e-vehicles.pdf. Viitattu: 12.6.2012.
- [40] MENNEKES Elektrotechnik GmbH & Co. KG. 2011. Vehicle inlets and connectors type 2 for AC and DC charging. Saantitapa: http://www.mennekes.de/uploads/media/MENNEKES_Media_information_-_Charging_couplers_Type_2_for_AC_and_DC_charging.pdf. Viitattu: 12.6.2012.
- [41] Ensto Finland Oy. 2011. Sähköautojen latausasemat. Saantitapa: http://www.ensto.com/download/20577_A4_leaflet_EVC_FIN.pdf. Viitattu: 12.6.2012.
- [42] GARO Finland Oy. 2010. Latausasemat. Saantitapa: http://www.garo.fi/fileadmin/garofi/Kataloger/Laddstolpe_GARO_100118__FI_web.pdf. Viitattu: 12.6.2012.
- [43] Schneider Electric. EVlink charging solutions for electric vehicles – EVlink residential for home. Saantitapa: www.schneider-electric.com. Viitattu: 12.6.2012.
- [44] Siemens Industry, Inc. 2012. VersiCharge Electric Vehicle Charging Stations. Saantitapa: http://www.sea.siemens.com/us/Products/Residential-Electrical/Product/Documents/SIE_DS-VersiCharge%20Data%20Sheet.pdf. Viitattu: 12.6.2012.
- [45] ABB Oy. 2011. Operaatio sähköauton vapautus. Saantitapa: <http://www.abb.fi/cawp/seitp202/a55b08f9d3c969e7c1257822002b880a.aspx>. Viitattu: 12.6.2012.
- [46] Löf, N. Katkaisulaitteella varustettujen AMR-mittareiden hyödyntäminen – toimintojen kuvaus ja vaatimusmäärittelyt. Tekninen raportti, TTY, sähköenergiatekniikka, 2010.
- [47] Better Place. Battery switch stations. Saantitapa: <http://www.betterplace.com/the-solution-switch-stations>. Viitattu: 12.6.2012.

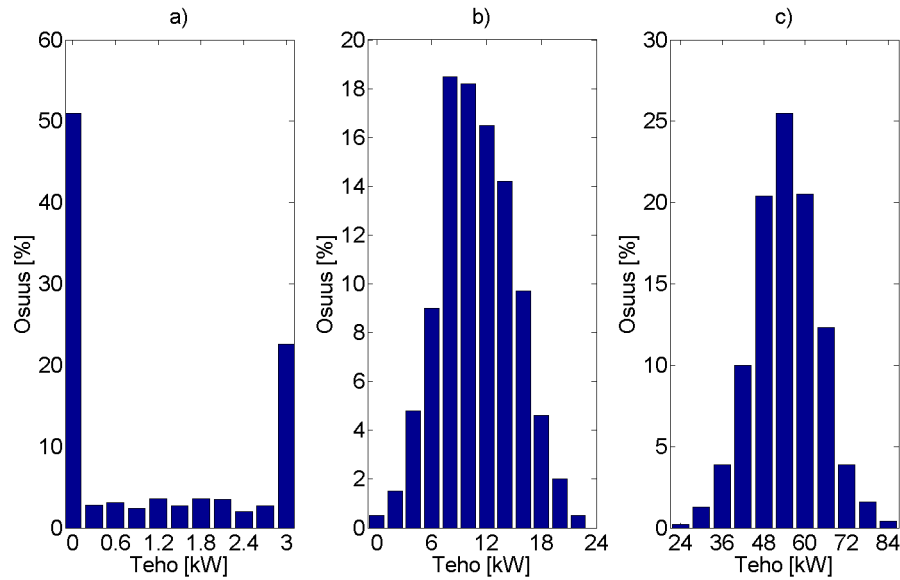
- [48] Fortum Oyj. 2011. Ladattavat autot kiinteistöjen sisäisissä sähköverkoissa – suositus. Saantitapa: <http://verkkojulkaisu.viivamedia.fi/fortumesfi/ladattavatautotsuositus/8>. Viitattu: 13.6.2012.
- [49] Hutri, J. *Sähköauto tulee! – Kuluttajien odotuksia sähköautoista*. Diplomityö, Helsingin yliopisto, Helsinki, 2011. 88 s.
- [50] Romana, L. ja Lehtonen, M. Billing and metering infrastructure - communication needs. Tekninen raportti, Aalto-yliopisto, Helsinki, 2011. SIMBe project D4.2.
- [51] Lopes, J., Soares, F. ja Almeida, P. Integration of electric vehicles in the electric power system. *Proceedings of the IEEE*, 99(1):168 –183, jan. 2011. ISSN 0018-9219. doi:10.1109/JPROC.2010.2066250.
- [52] Rautiainen, A., Repo, S. ja Järventausta, P. Intelligent charging of plug-in vehicles. *Nordic Electricity and Asset Management Conference (NORDAC)*. Aalborg, Denmark, 2010.
- [53] Callaway, D. ja Hiskens, I. Achieving controllability of electric loads. *Proceedings of the IEEE*, 99(1):184 –199, jan. 2011. ISSN 0018-9219. doi:10.1109/JPROC.2010.2081652.
- [54] Kirschen, D. Demand-side view of electricity markets. *Power Systems, IEEE Transactions on*, 18(2):520 – 527, may 2003. ISSN 0885-8950. doi:10.1109/TPWRS.2003.810692.
- [55] Strbac, G. Demand side management: Benefits and challenges. *Energy Policy*, 36(12):4419 – 4426, 2008. ISSN 0301-4215. doi:10.1016/j.enpol.2008.09.030.
- [56] Tikka, V., Lassila, J., Haakana, J. ja Partanen, J. Case study of the effects of electric vehicle charging on grid loads in an urban area. Teoksessa *Innovative Smart Grid Technologies (ISGT Europe), 2011 2nd IEEE PES International Conference and Exhibition on*, ss. 1 – 7. dec. 2011. ISSN 2165-4816. doi: 10.1109/ISGTEurope.2011.6162667.
- [57] Qian, K., Zhou, C., Allan, M. ja Yuan, Y. Load model for prediction of electric vehicle charging demand. Teoksessa *Power System Technology (POWERCON), 2010 International Conference on*, ss. 1 – 6. oct. 2010. doi: 10.1109/POWERCON.2010.5666587.
- [58] Valtioneuvosto. 2009. Valtioneuvoston asetus sähköntoimitusten selvityksestä ja mittauksesta. 66/2009. 5.2.2009. Saantitapa: [http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2009/20090066?search\[type\]=pika&search\[pika\]=66%2F2009](http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2009/20090066?search[type]=pika&search[pika]=66%2F2009). Viitattu: 13.6.2012.
- [59] Oy Turku Energia - Åbo Energi Ab. Markkinasähkö. Saantitapa: <http://www.markkinasahko.fi>. Viitattu: 13.6.2012.
- [60] Hu, W., Chen, Z. ja Bak-Jensen, B. Optimal operation of electric vehicles in competitive electricity markets and its impact on distribution power systems.

- Teoksessa *PowerTech, 2011 IEEE Trondheim*, ss. 1 – 7. june 2011. doi:10.1109/PTC.2011.6019217.
- [61] Clement-Nyns, K., Haesen, E. ja Driesen, J. The impact of charging plug-in hybrid electric vehicles on a residential distribution grid. *Power Systems, IEEE Transactions on*, 25(1):371 –380, feb. 2010. ISSN 0885-8950. doi:10.1109/TPWRS.2009.2036481.
 - [62] Markel, T., Kuss, M. ja Denholm, P. Communication and control of electric drive vehicles supporting renewables. Teoksessa *Vehicle Power and Propulsion Conference, 2009. VPPC '09. IEEE*, ss. 27 – 34. sept. 2009. doi:10.1109/VPPC.2009.5289874.
 - [63] Verzijlbergh, R., Lukszo, Z., Veldman, E., Slootweg, J. ja Ilic, M. Deriving electric vehicle charge profiles from driving statistics. Teoksessa *Power and Energy Society General Meeting, 2011 IEEE*, ss. 1 – 6. july 2011. ISSN 1944-9925. doi:10.1109/PES.2011.6039609.
 - [64] Mets, K., Verschueren, T., Haerick, W., Develder, C. ja De Turck, F. Optimizing smart energy control strategies for plug-in hybrid electric vehicle charging. Teoksessa *Network Operations and Management Symposium Workshops (NOMS Wksp), 2010 IEEE/IFIP*, ss. 293 – 299. april 2010. doi:10.1109/NOMSW.2010.5486561.
 - [65] Mets, K., Verschueren, T., De Turck, F. ja Develder, C. Evaluation of multiple design options for smart charging algorithms. Teoksessa *Communications Workshops (ICC), 2011 IEEE International Conference on*, ss. 1 – 5. june 2011. doi:10.1109/iccw.2011.5963579.
 - [66] Fingrid Oyj. Sähkön kulutus ja tuotanto. Saantitapa: http://www.fingrid.fi/portal/suomeksi/sahkomarkkinat/sahkon_kulutus_ja_tuotanto/sahkon_kulutus_ja_tuotanto/?ts=consumption. Viitattu: 13.6.2012.
 - [67] Renner, H. ja Sakulin, M. Power quality, 2007. Kurssimateriaali. 117 s.
 - [68] SFS-EN 50160. Yleisen jakeluverkon jakelujännitteen ominaisuudet. Suomen Standardisoimisliitto SFS ry, Helsinki, 3. painos painos, 2008. 34 s.
 - [69] Kyyrä, J. Suuntaajatekniikka, 2010. Kurssimateriaali. 320 s.
 - [70] Lakervi, E. ja Partanen, J. *Sähkönjakelutekniikka*. Otatieto, Helsinki, 2. painos painos, 2008. 295 s. ISBN 978-951-672-359-7.
 - [71] IEEE Working Group for Loading Mineral-Oil-Immersed Transformers. IEEE Guide for Loading Mineral-Oil-Immersed Transformers. *IEEE Std C57.91-1995*, s. i, 1996. doi:10.1109/IEEESTD.1996.79665.
 - [72] Tikka, V. *Sähköautojen pikalatauksen verkkovaikutukset*. Diplomityö, Lappeenrannan teknillinen yliopisto, Lappeenranta, 2010. 105 s.

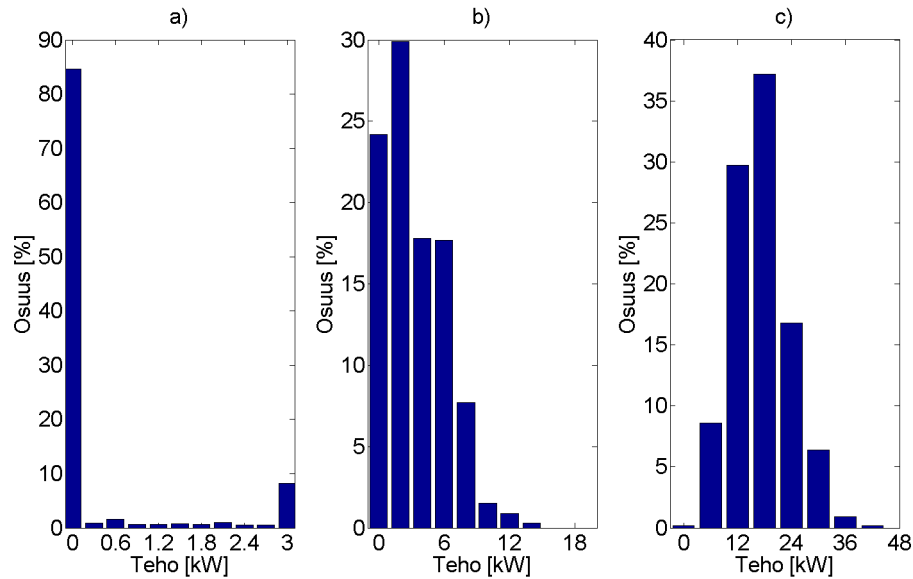
- [73] Gómez San Román, T., Cossent, R., Domingo, C.M. ja Frías, P. Assessment of the impact of plug-in electric vehicles on distribution networks. *Power Systems, IEEE Transactions on*, 26(1):206 –213, feb. 2011. ISSN 0885-8950. doi:10.1109/TPWRS.2010.2049133.
- [74] Hilshey, A.D., Hines, P.D.H. ja Dowds, J.R. Estimating the acceleration of transformer aging due to electric vehicle charging. Teoksessa *Power and Energy Society General Meeting, 2011 IEEE*, ss. 1 – 9. july 2011. ISSN 1944-9925. doi: 10.1109/PES.2011.6039848.
- [75] Rutherford, M. ja Yousefzadeh, V. The impact of electric vehicle battery charging on distribution transformers. Teoksessa *Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2011 Twenty-Sixth Annual IEEE*, ss. 396 – 400. march 2011. ISSN 1048-2334. doi:10.1109/APEC.2011.5744627.
- [76] Pillai, J. ja Bak-Jensen, B. Impacts of electric vehicle loads on power distribution systems. Teoksessa *Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), 2010 IEEE*, ss. 1 –6. sept. 2010. doi:10.1109/VPPC.2010.5729191.
- [77] Shahnian, F., Ghosh, A., Ledwich, G. ja Zare, F. Voltage unbalance sensitivity analysis of plug-in electric vehicles in distribution networks. Teoksessa *Universities Power Engineering Conference (AUPEC), 2011 21st Australasian*, ss. 1 – 6. sept. 2011.
- [78] Wenge, C., Stotzer, M., Winkler, T. ja Komarnicki, P. Power quality measurements of electric vehicles in the low voltage power grid. Teoksessa *Electrical Power Quality and Utilisation (EPQU), 2011 11th International Conference on*, ss. 1 – 5. oct. 2011. ISSN 2150-6647. doi:10.1109/EPQU.2011.6128866.
- [79] Melo, N., Mira, F., de Almeida, A. ja Delgado, J. Integration of PEV in Portuguese distribution grid: Analysis of harmonic current emissions in charging points. Teoksessa *Electrical Power Quality and Utilisation (EPQU), 2011 11th International Conference on*, ss. 1 – 6. oct. 2011. ISSN 2150-6647. doi: 10.1109/EPQU.2011.6128893.
- [80] Seppälä, A. *Load research and load estimation in electricity distribution*. Väitöskirja, Teknillinen korkeakoulu, Espoo, 1996. 118 s.
- [81] Sähköenergialiitto ry SENER. Verkostosuositus SA 10:92. Verkon mitoitusenergiat, 1992.
- [82] Meldorf, M., Täht, T., Lehtonen, M., Jalonen, M. ja Seppälä, A. A method for assessing the maximum load flows in distribution systems. *Power Systems Computation Conference (PSCC)*. Trondheim, Norway, 1999.
- [83] Ross, S.M. *Introduction to Probability and Statistics for Engineers and Scientists*. Academic Press, Los Angeles, 4. painos painos, 2009. 680 s. ISBN 13:978-0-12-370483-2.

- [84] Nord Pool Spot. Elspot prices. Saantitapa: <http://www.nordpoolspot.com/Market-data1/Elspot/Area-Prices/ALL1/Hourly/>. Viitattu: 14.6.2012.
- [85] Soares, F.J., Lopes, J.A.P. ja Almeida, P.M.R. A monte carlo method to evaluate electric vehicles impacts in distribution networks. Teoksessa *Innovative Technologies for an Efficient and Reliable Electricity Supply (CITRES)*, 2010 IEEE Conference on, ss. 365 – 372. sept. 2010. doi:10.1109/CITRES.2010.5619777.
- [86] Desbiens, C. Electric vehicle model for estimating distribution transformer load for normal and cold-load pickup conditions. Teoksessa *Innovative Smart Grid Technologies (ISGT)*, 2012 IEEE PES, ss. 1 – 6. jan. 2012. doi:10.1109/ISGT.2012.6175606.
- [87] Law, A.M. ja Kelton, W.D. *Simulation Modeling and analysis*. McGraw-Hill, Boston, 3. painos painos, 2000. 760 s. ISBN 0-07-059292-6.
- [88] Mellin, I. Todennäköisyyslaskenta ja tilastotiede: kaavat, 2008. Kurssimateriaali. 236 s.
- [89] Rautiainen, A., Repo, S., Järventausta, P., Mutanen, A. ja Vuorilehto, K. Statistical charging load modeling of phev in electricity distribution networks using national travel survey data. Ehdotettu: IEEE Trans. on Smart Grids.
- [90] Tilastokeskus. Suomen virallinen tilasto (SVT): Asunnot ja asuinolot [verkojulkaisu]. ISSN=1798-6745. 2011. Saantitapa: <http://tilastokeskus.fi/til/asas/tie.html>. Viitattu: 13.7.2012.
- [91] Liikenteen turvallisuusvirasto Trafi. Liikenteessä olevat ajoneuvot 2011. Saantitapa: http://www.trafi.fi/palvelut/tilastot/tieliikenne/ajoneuvokanta/liikenteessa_olevat_2011. Viitattu: 13.7.2012.

A Tuntikeskitehojen jakaumien normalisuus



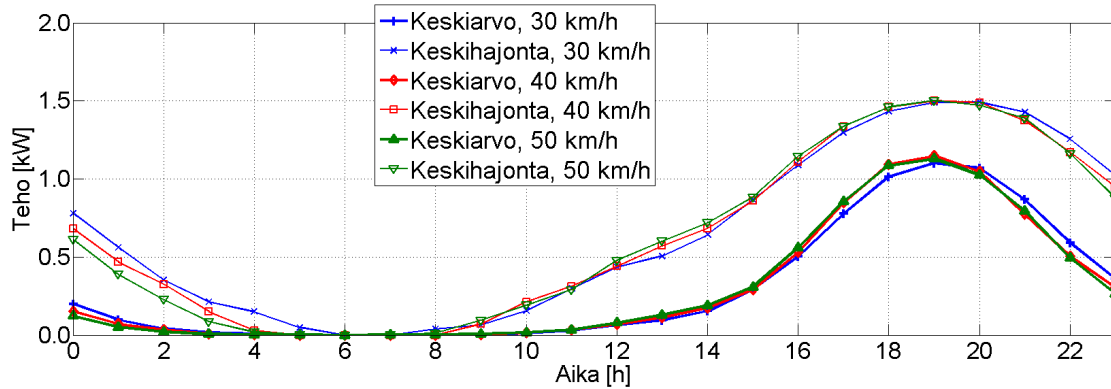
Kuva A1: Lataamisen keskitehojen jakautuminen tunnin 19 – 20 aikana. a) Yhden auton latauksen tuntikeskitehon vaihtelu b) 10 auton latauksen tuntikeskitehon vaihtelu ja c) 50 auton latauksen tuntikeskitehon vaihtelu.



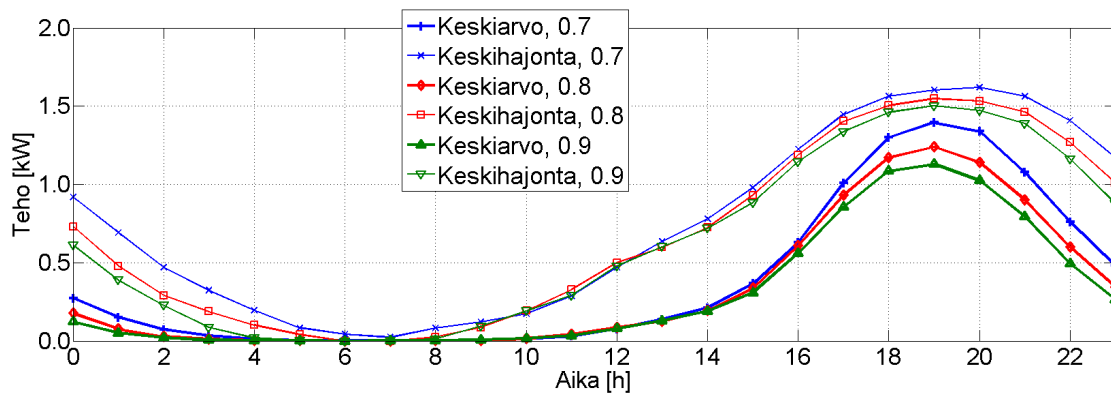
Kuva A2: Lataamisen keskitehojen jakautuminen tunnin 23 – 24 aikana. a) Yhden auton latauksen tuntikeskitehon vaihtelu b) 10 auton latauksen tuntikeskitehon vaihtelu ja c) 50 auton latauksen tuntikeskitehon vaihtelu.

B Parametrien varioinnin vaikutus latauskäyrissä

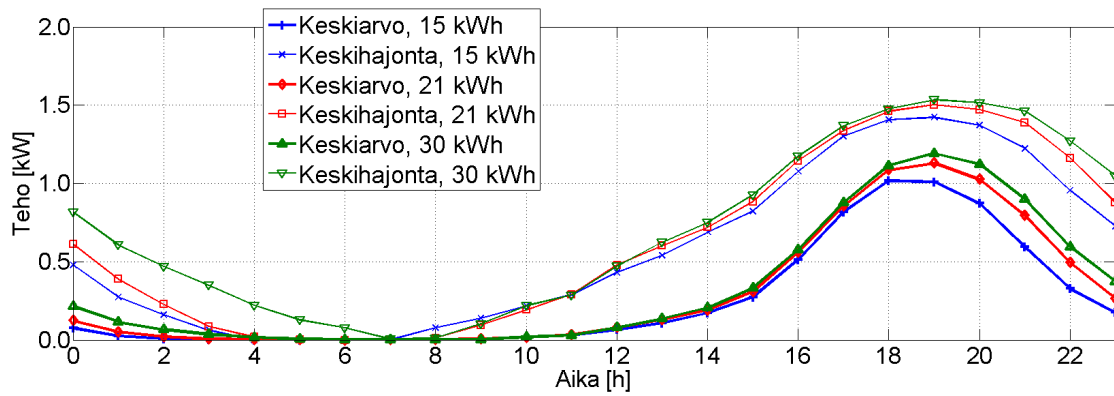
Kaikissa liitteen kuvissa käytetään keskinopeutta 50 km/h, latauksen hyötysuhdetta 0,9, akuston kapasiteettia 21 kWh, kulutusta 0,2 kWh/km ja lataustehoa 3,7 kW, jos kyseessä ei ole varioitava parametri. Auto ajaa päivän aikana töihin, töistä vapaa-ajan ajoon ja sieltä kotiin, ja lataa vain kotona.



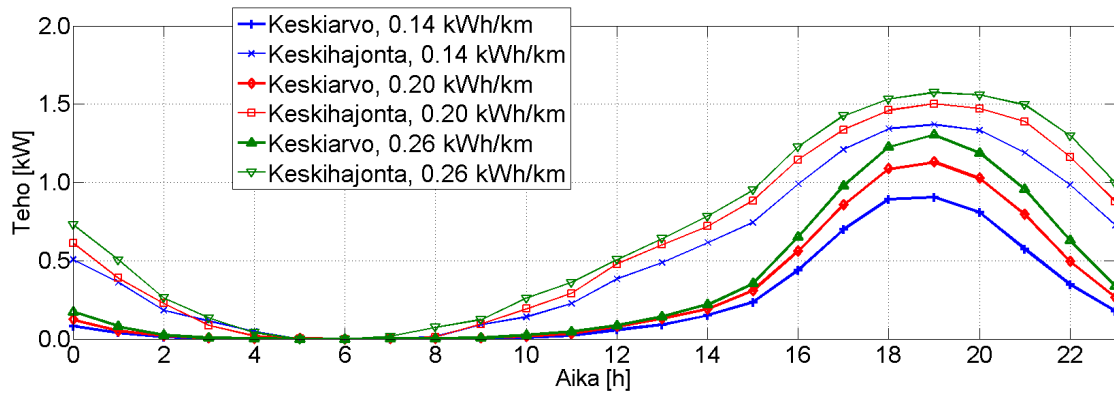
Kuva B1: Sähköauton keskinopeuden variointi.



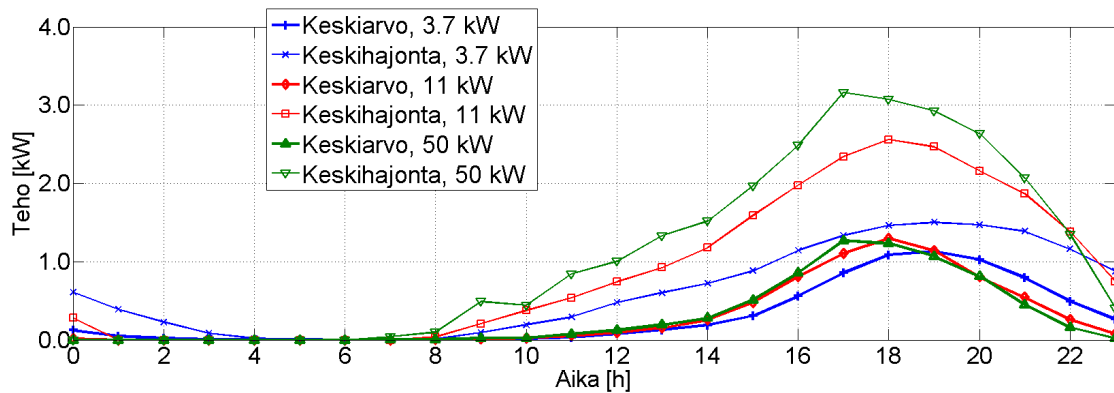
Kuva B2: Sähköauton latauksen hyötysuhteen variointi.



Kuva B3: Sähköauton akuston koon variointi.

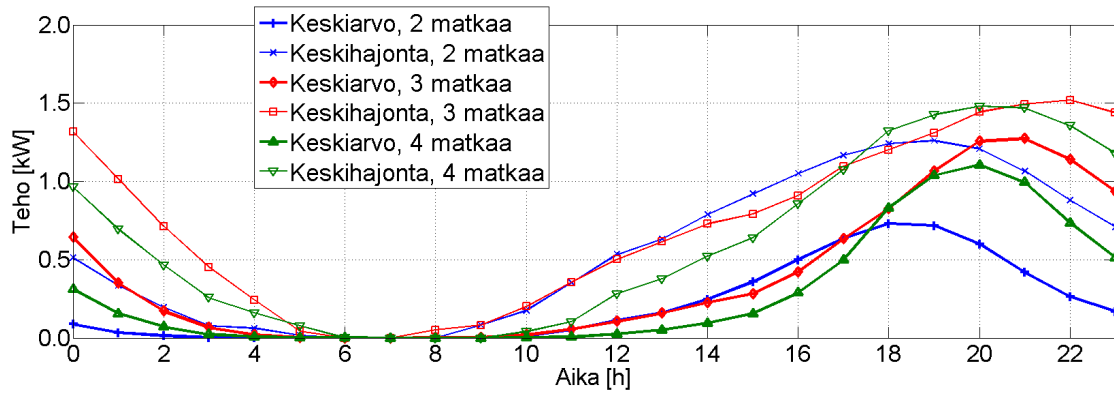


Kuva B4: Sähköauton kulutuksen variointi.

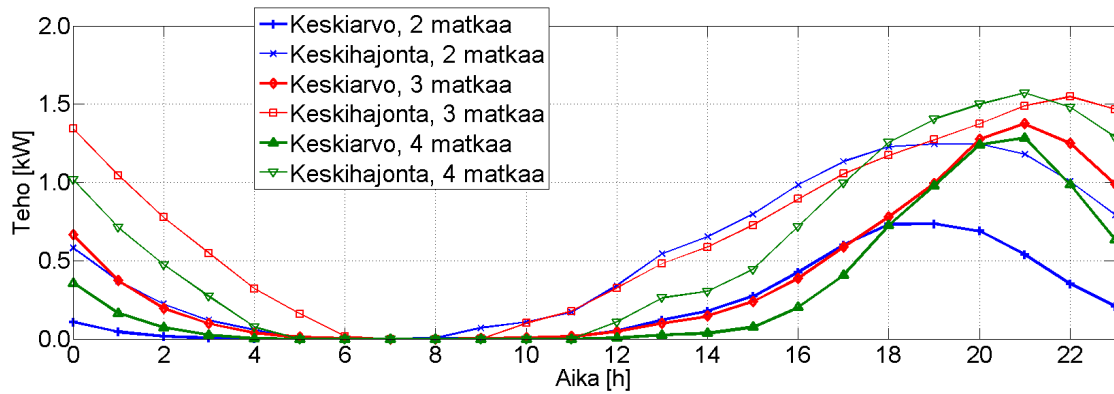


Kuva B5: Sähköauton lataustehon variointi.

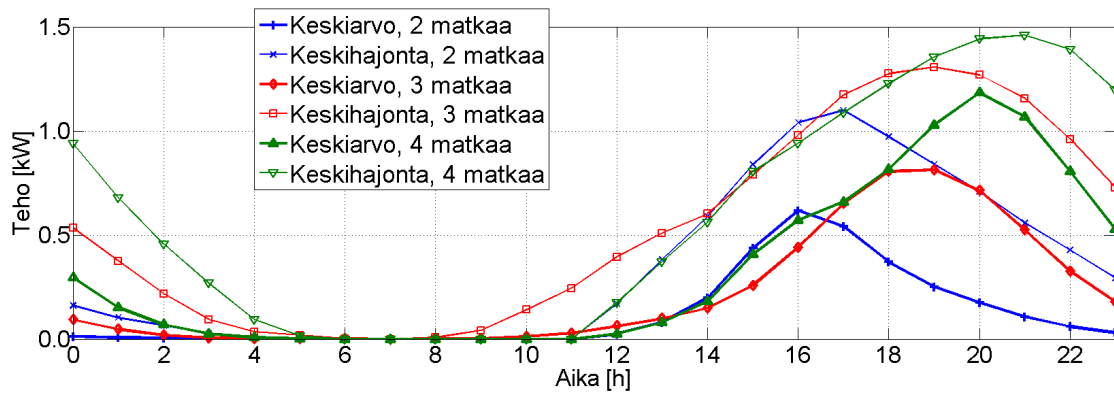
C Simulointimallilla saatuja latauskäyriä



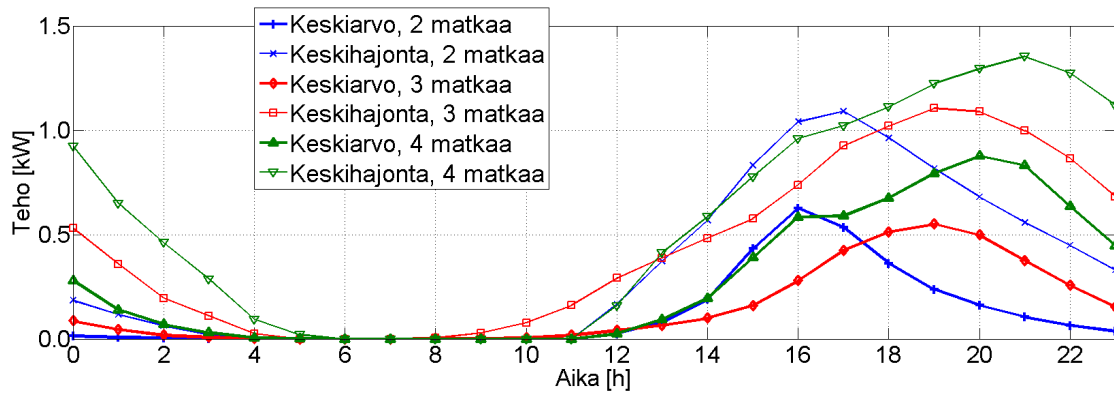
Kuva C1: Sähköauton lataus aattona. Lataus tapahtuu 3,7 kW:n teholla vain kotona.



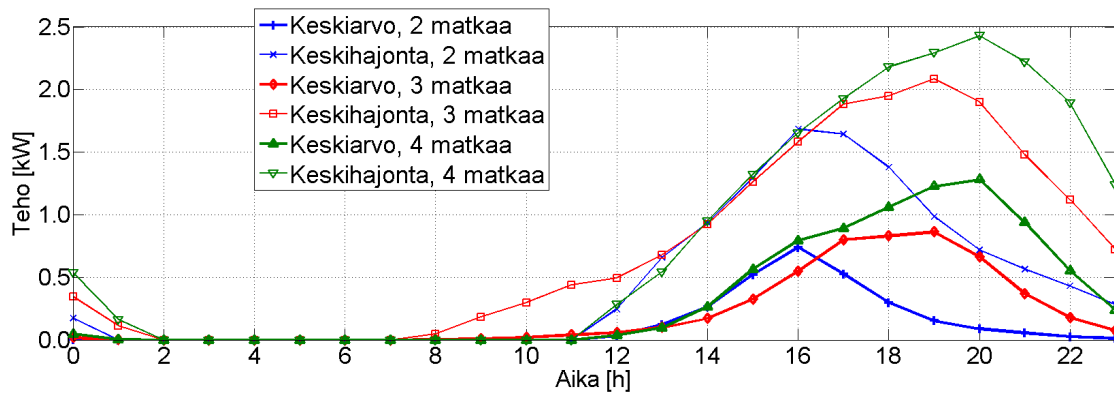
Kuva C2: Sähköauton lataus pyhänä. Lataus tapahtuu 3,7 kW:n teholla vain kotona.



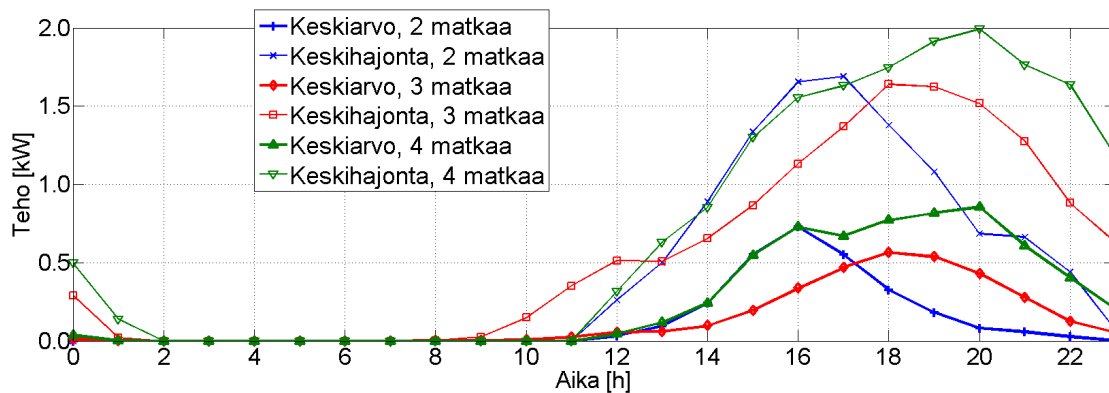
Kuva C3: Sähköauton lataus kotona, kun autoa ladataan 3,7 kW:n teholla töissä ja kotona.



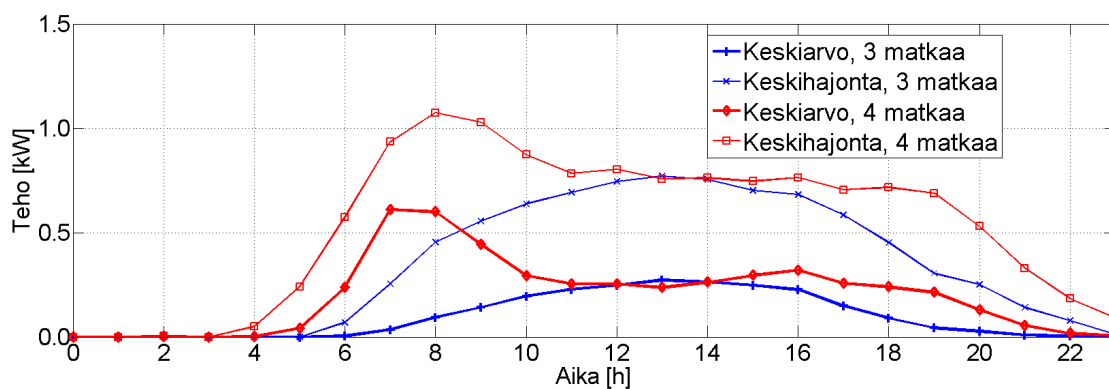
Kuva C4: Sähköauton lataus kotona, kun autoa ladataan 3,7 kW:n teholla töissä, julkisessa latauksessa ja kotona.



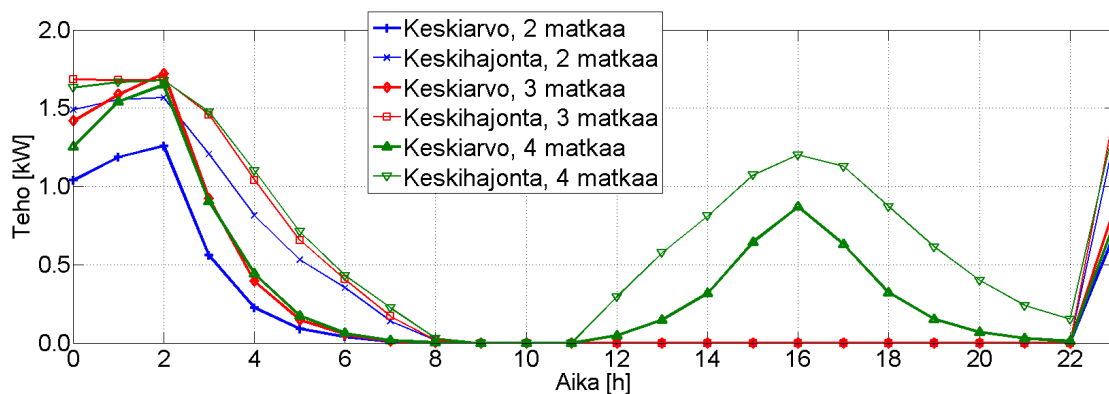
Kuva C5: Sähköauton lataus kotona, kun autoa ladataan 11 kW:n teholla töissä ja kotona.



Kuva C6: Sähköauton lataus kotona, kun autoa ladataan 11 kW:n teholla töissä, julkisessa latauksessa ja kotona.

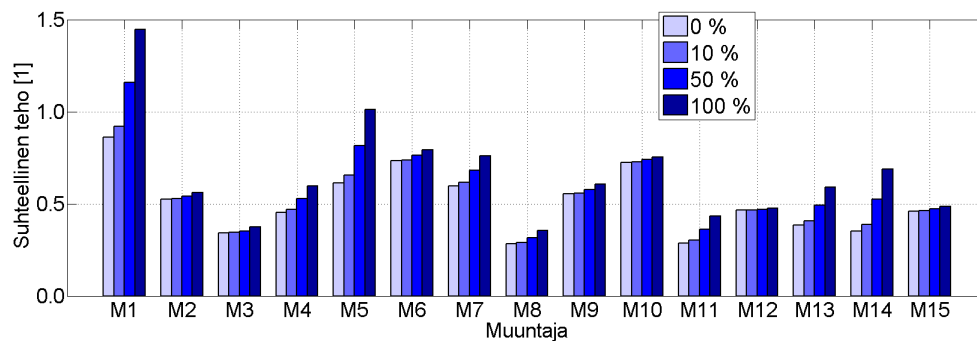


Kuva C7: Sähköauton lataus työpaikalla ja julkisessa latauksessa, kun auto käyt töistä työasioilla ja kun autoa ladataan 3,7 kW:n teholla töissä ja julkisessa latauspaikassa.

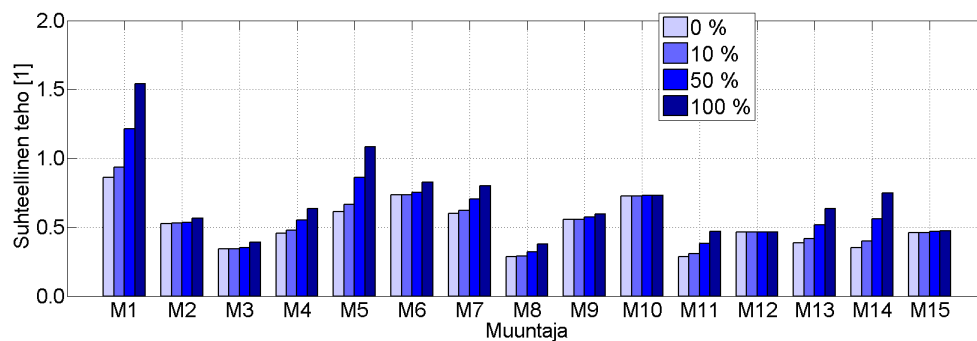


Kuva C8: Latauksen ohjaaminen viivästä-mällä. Lataus tapahtuu 3,7 kW:n teholla vain kotona. Lataus kytketään päälle kello 23 alkaen porrastettuna kello 02 asti.

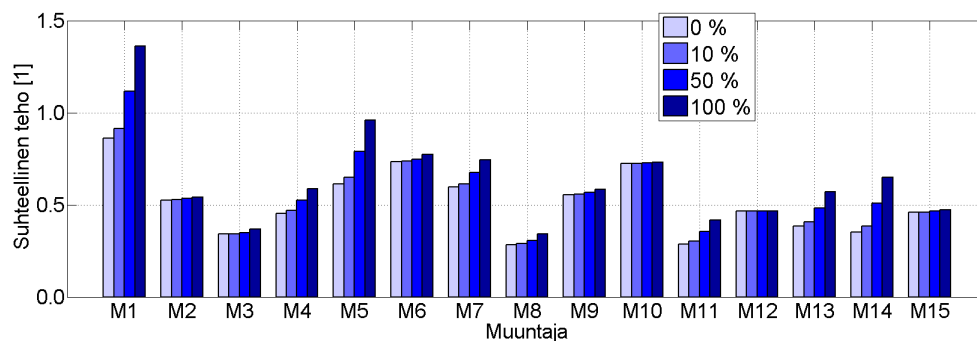
D Muuntajien kuormittuminen asuinalueilla



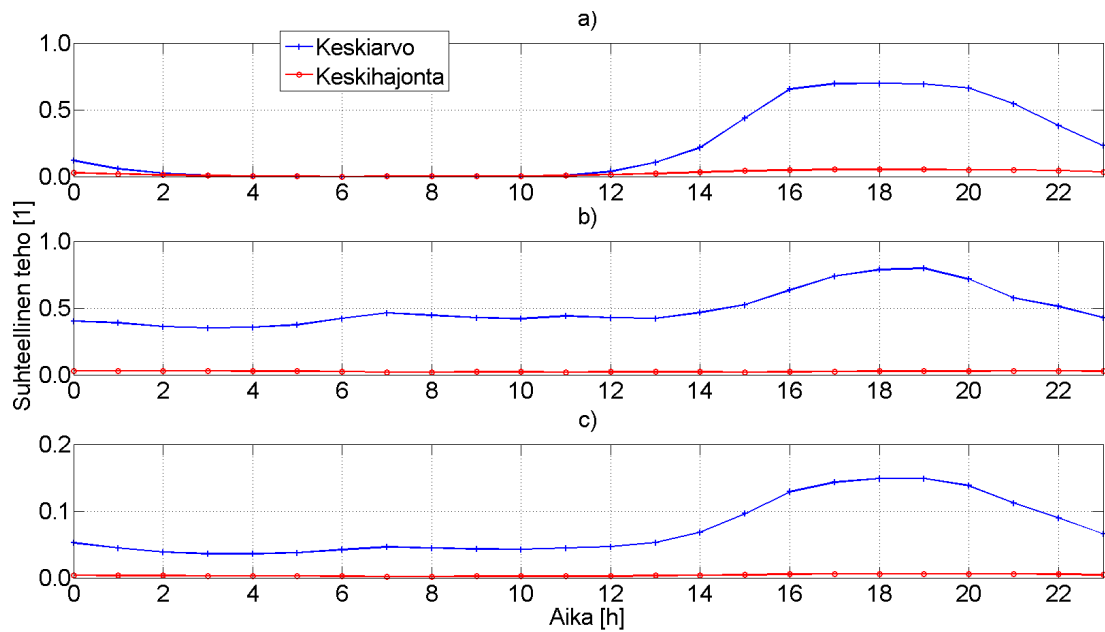
Kuva D1: Asuinalueiden jakelumuuntajien suhteellinen huipputeho, kun autoa voidaan ladata kodin lisäksi työpaikalla 3,7 kW:n teholla.



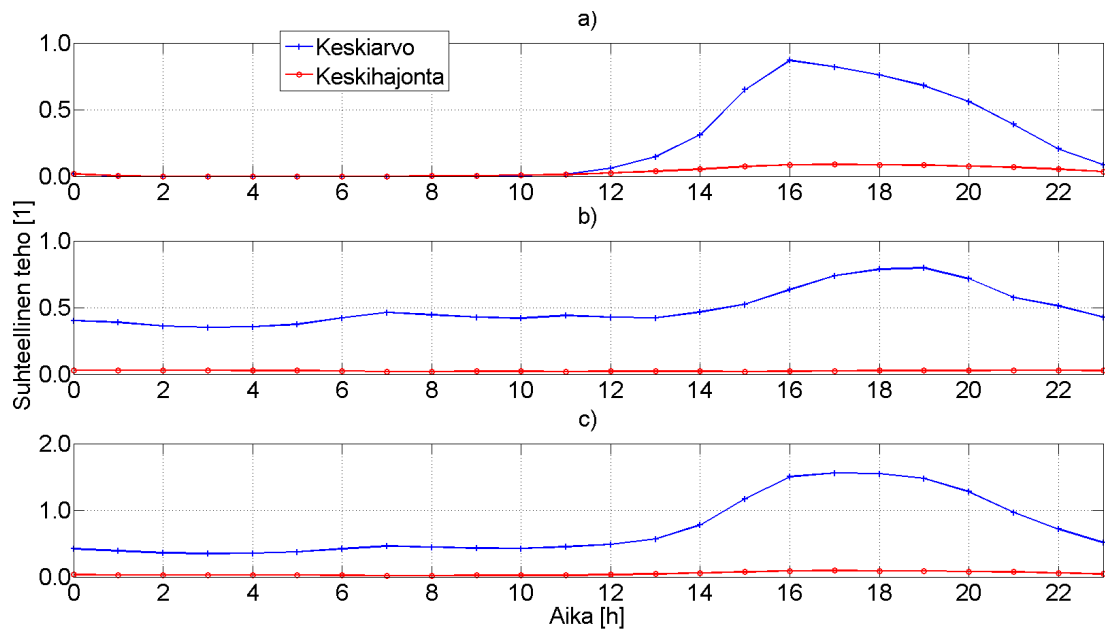
Kuva D2: Asuinalueiden jakelumuuntajien suhteellinen huipputeho, kun autoa voidaan ladata kodin lisäksi työpaikalla 11 kW:n teholla.



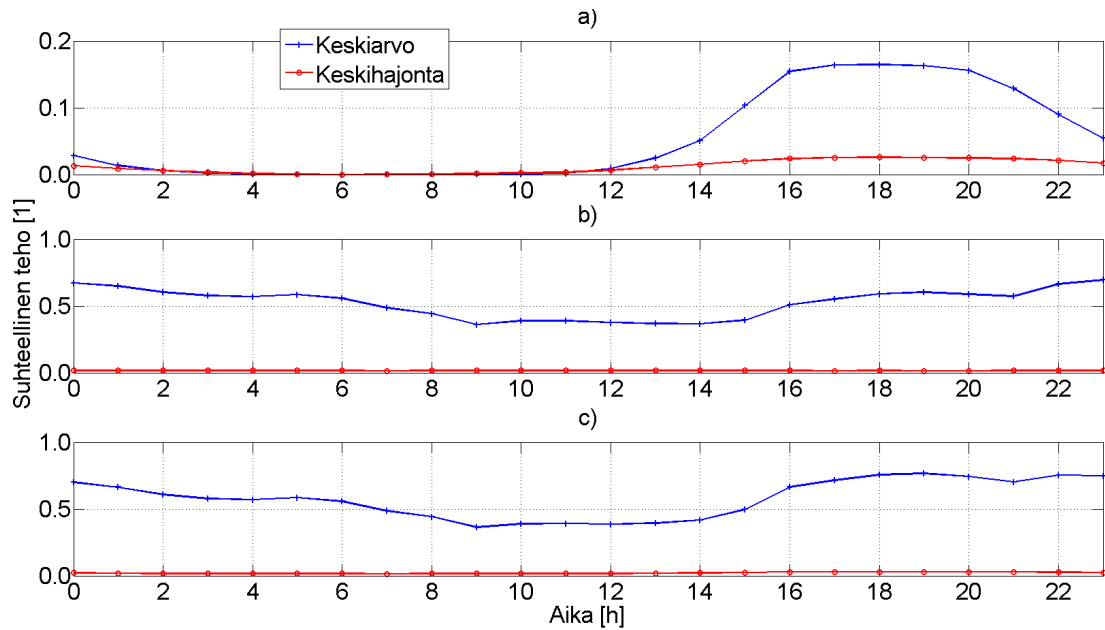
Kuva D3: Asuinalueiden jakelumuuntajien suhteellinen huipputeho, kun autoa voidaan ladata kodin lisäksi työpaikalla ja julkisessa latauksessa 11 kW:n teholla.



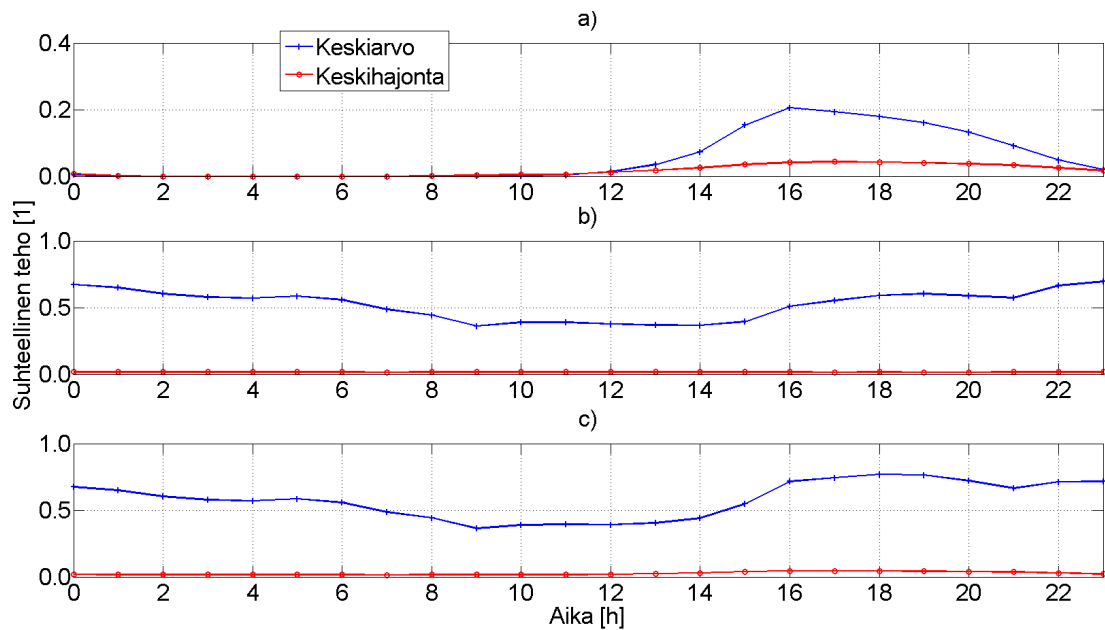
Kuva D4: Sähköautojen latauskäyrän (a) summautuminen jakelumuuntajan M1 peruskuormaan (b). Kokonaiskuorma kuvassa (c). Lataus tapahtuu vain kotona 3,7 kW:n teholla. 100 % penetraatio.



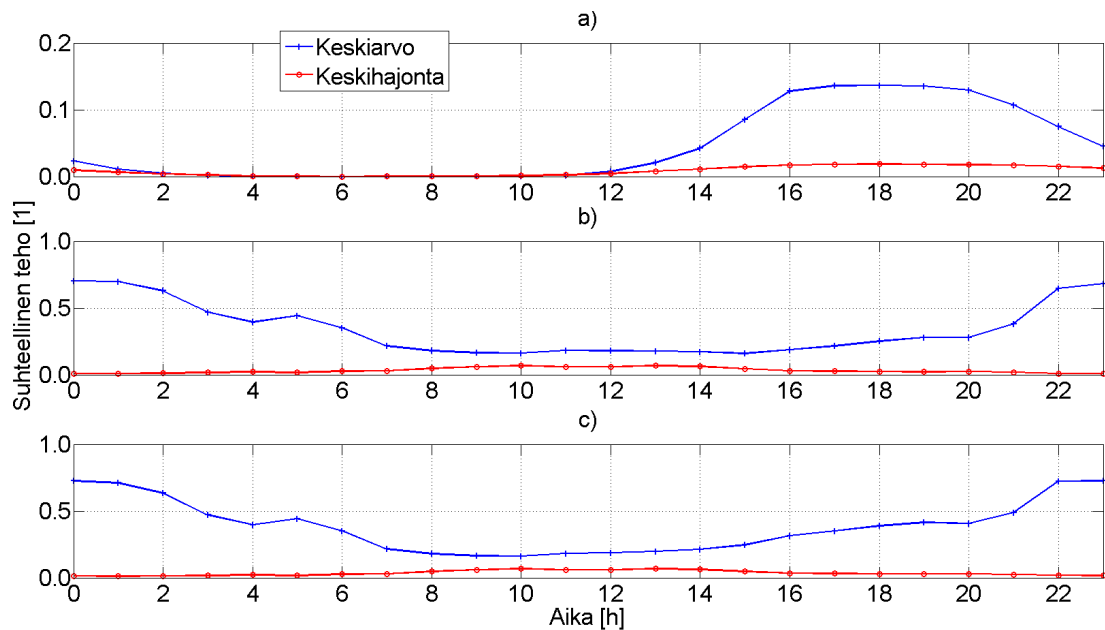
Kuva D5: Sähköautojen latauskäyrän (a) summautuminen jakelumuuntajan M1 peruskuormaan (b). Kokonaiskuorma kuvassa (c). Lataus tapahtuu vain kotona 11 kW:n teholla. 100 % penetraatio.



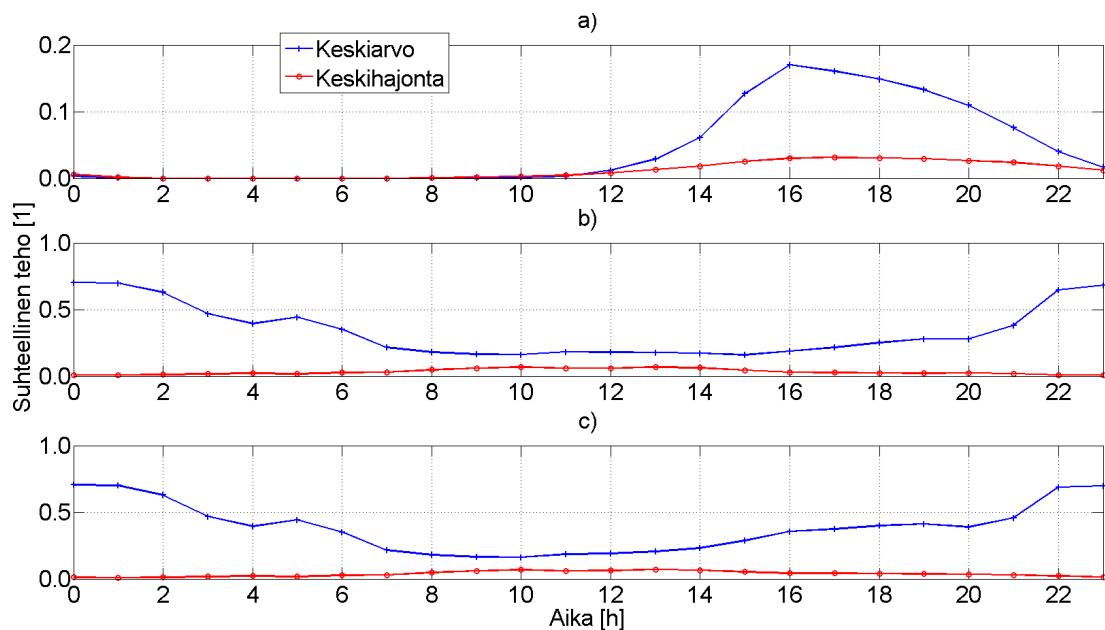
Kuva D6: Sähköautojen latauskäyrän (a) summautuminen jakelumuuntajan M6 peruskuormaan (b). Kokonaiskuorma kuvassa (c). Lataus tapahtuu vain kotona 3,7 kW:n teholla. 100 % penetraatio.



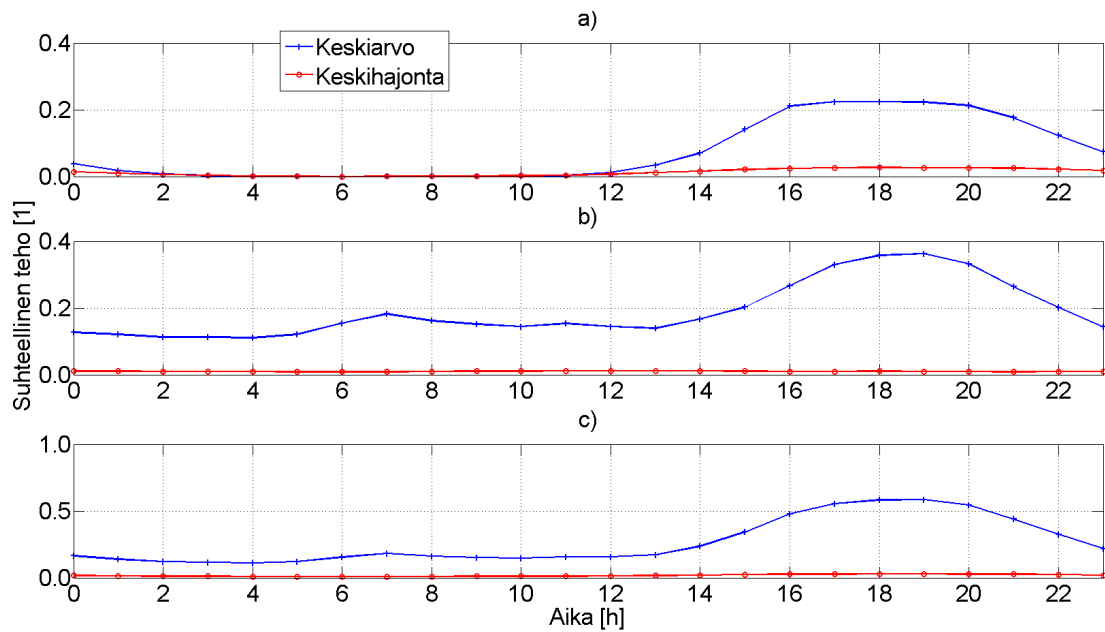
Kuva D7: Sähköautojen latauskäyrän (a) summautuminen jakelumuuntajan M6 peruskuormaan (b). Kokonaiskuorma kuvassa (c). Lataus tapahtuu vain kotona 11 kW:n teholla. 100 % penetraatio.



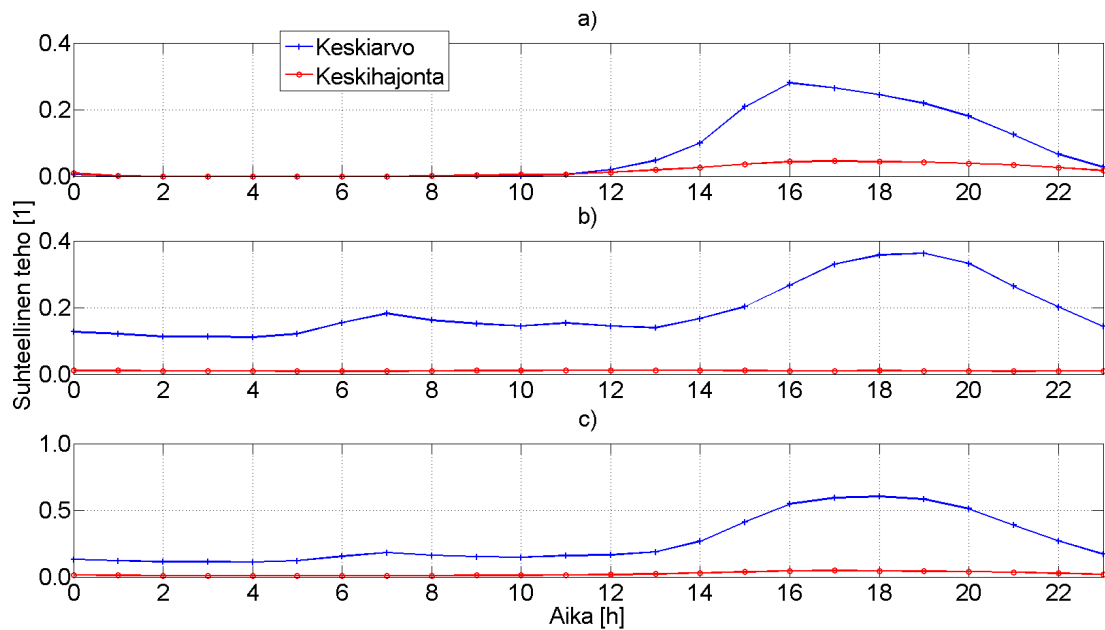
Kuva D8: Sähköautojen latauskäyrän (a) summautuminen jakelumuuntajan M10 peruskuormaan (b). Kokonaiskuorma kuvassa (c). Lataus tapahtuu vain kotona 3,7 kW:n teholla. 100 % penetraatio.



Kuva D9: Sähköautojen latauskäyrän (a) summautuminen jakelumuuntajan M10 peruskuormaan (b). Kokonaiskuorma kuvassa (c). Lataus tapahtuu vain kotona 11 kW:n teholla. 100 % penetraatio.

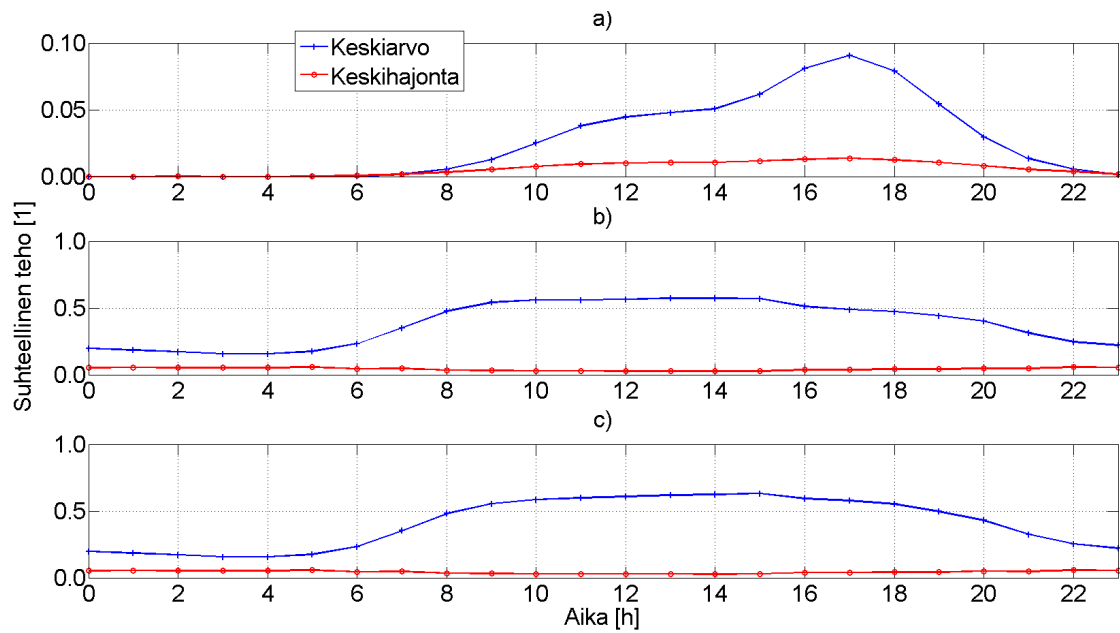


Kuva D10: Sähköautojen latauskäyrän (a) summautuminen jakelumuuntajan M13 peruskuormaan (b). Kokonaiskuorma kuvassa (c). Lataus tapahtuu vain kotona 3,7 kW:n teholla. 100 % penetraatio.

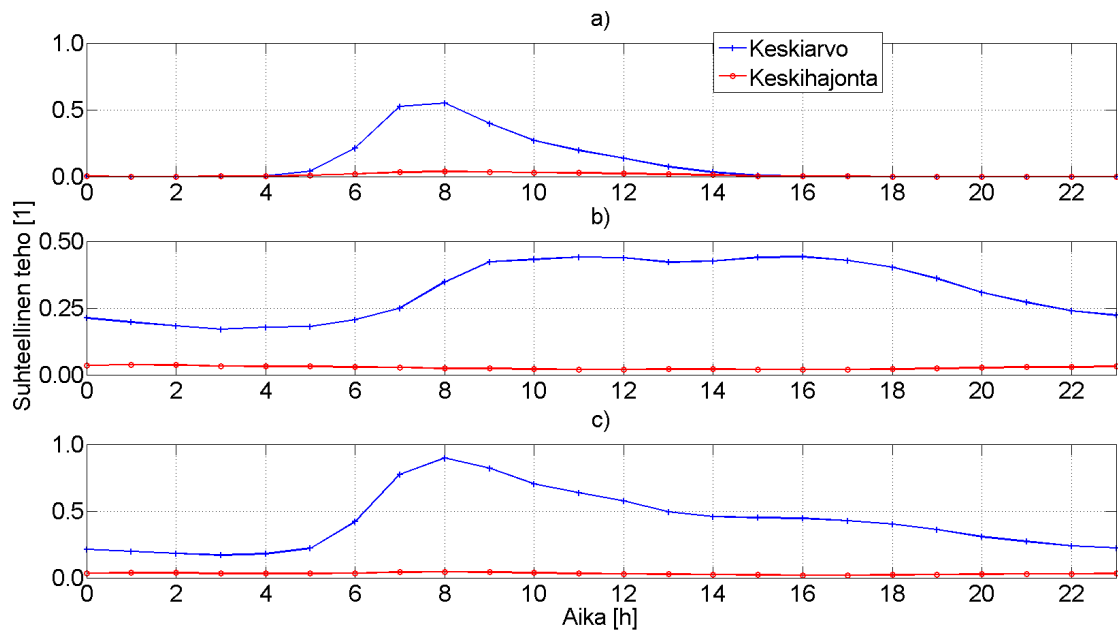


Kuva D11: Sähköautojen latauskäyrän (a) summautuminen jakelumuuntajan M13 peruskuormaan (b). Kokonaiskuorma kuvassa (c). Lataus tapahtuu vain kotona 11 kW:n teholla. 100 % penetraatio.

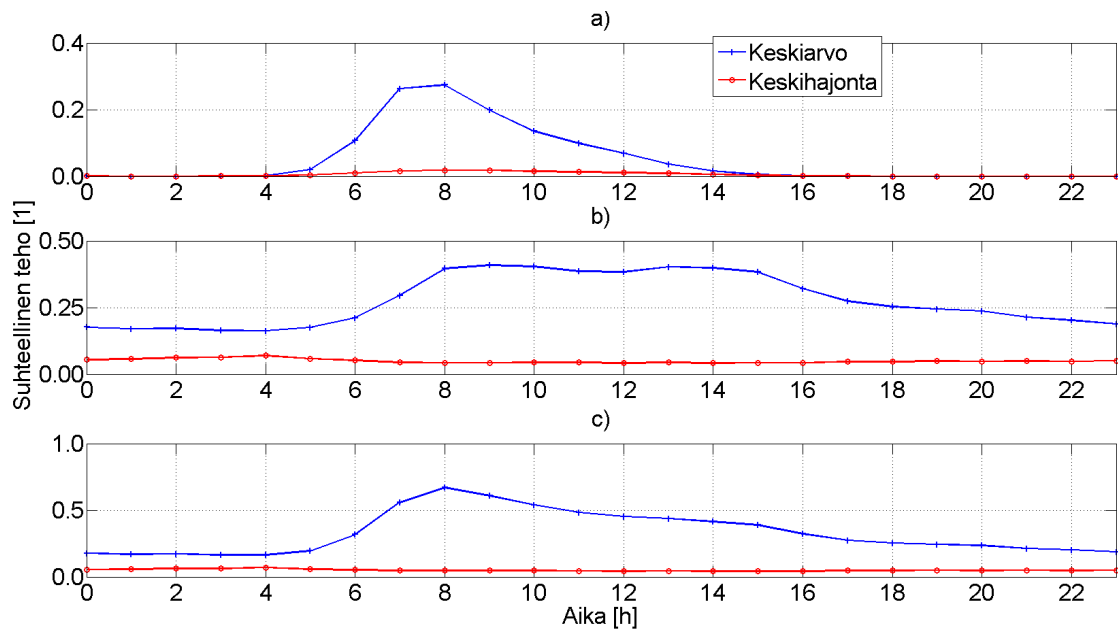
E Muuntajien kokonaiskuormien muodostuminen palvelualueella ja työpaikka-alueilla



Kuva E1: Sähköautojen latauskäyrän (a) summautuminen palvelualueen jakelumuuntajan M16 peruskuormaan (b). Kokonaiskuorma kuvassa (c). Lataus tapahtuu 3,7 kW:n teholla. 100 % penetraatio.

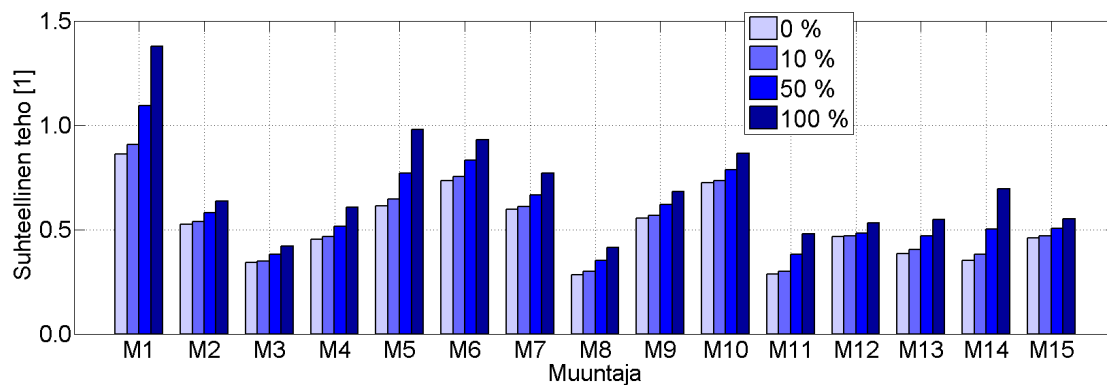


Kuva E2: Sähköautojen latauskäyrän (a) summautuminen työpaikka-alueen jakelumuuntajan M17 peruskuormaan (b). Kokonaiskuorma kuvassa (c). Lataus tapahtuu 3,7 kW:n teholla. 100 % penetraatio.

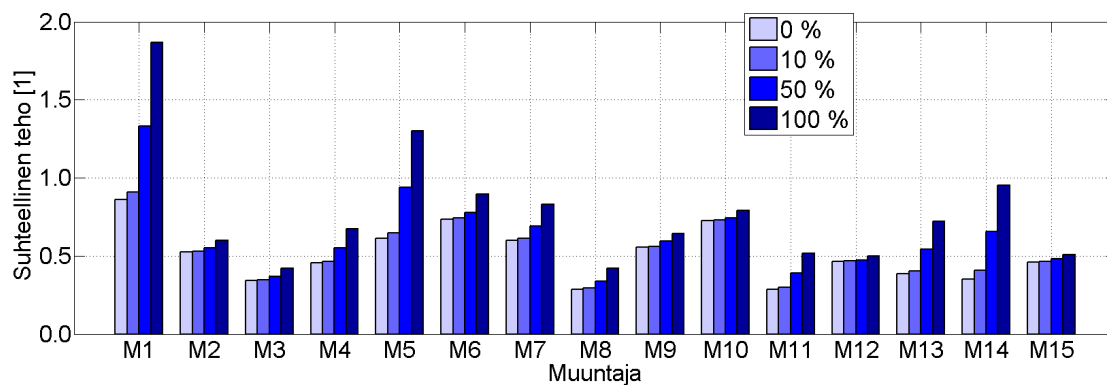


Kuva E3: Sähköautojen latauskäyrän (a) summautuminen työpaikka-alueen jakelumuuntajan M18 peruskuormaan (b). Kokonaiskuorma kuvassa (c). Lataus tapahtuu 3,7 kW:n teholla. 100 % penetraatio.

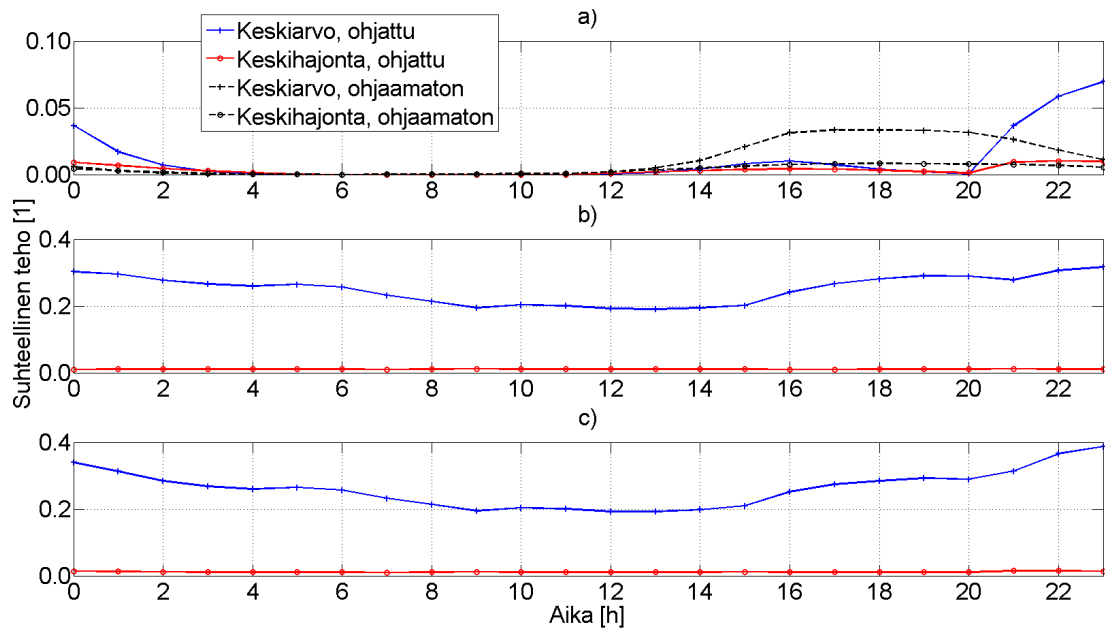
F Muuntajien kokonaiskuormien muodostuminen ohjattaessa



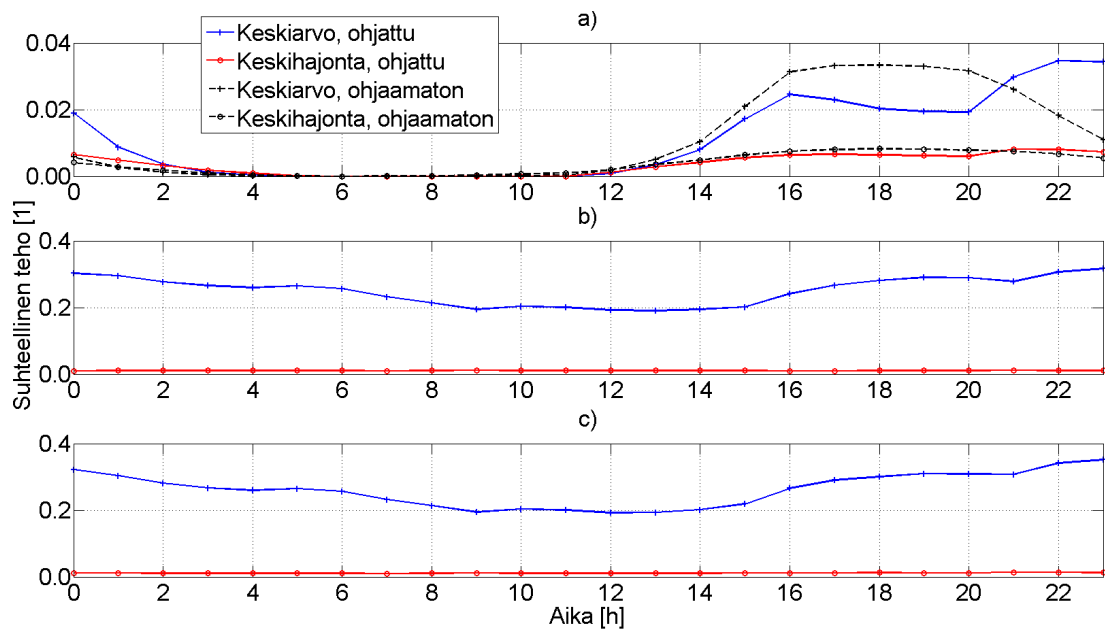
Kuva F1: Asuinalueiden jakelumuuntajien suhteellinen huipputeho, kun kolme matkaa vuorokaudessa ajavien autojen latausta ohjataan viivästetysti. Autoa ladataan vain kotona 3,7 kW:n teholla.



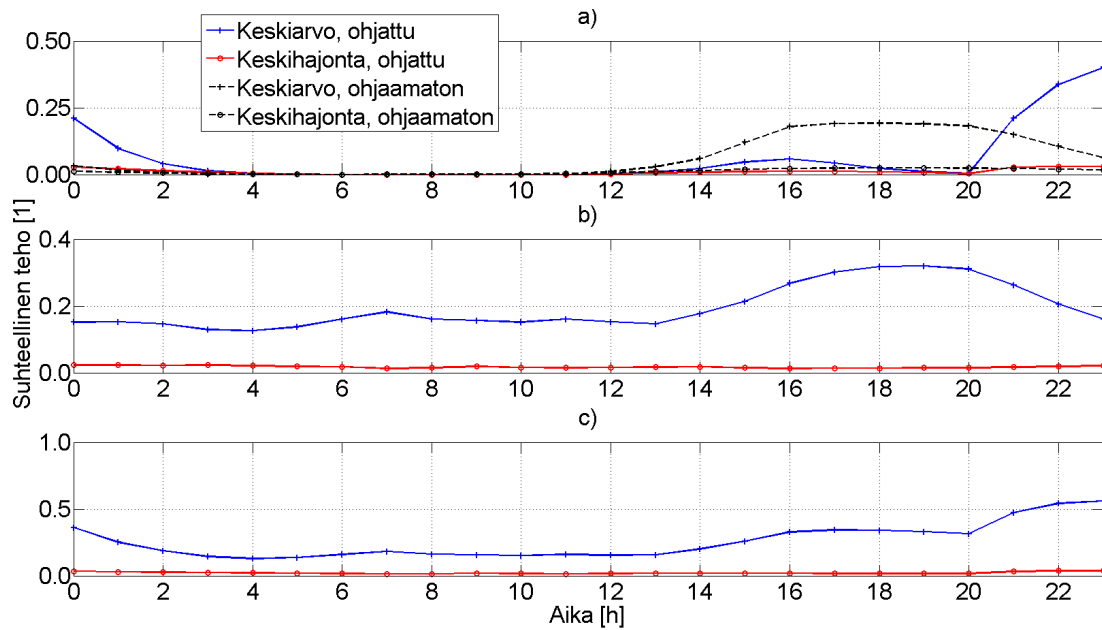
Kuva F2: Asuinalueiden jakelumuuntajien suhteellinen huipputeho, kun kolme matkaa vuorokaudessa ajavien autojen latausta ohjataan sähkön hinnan mukaan. Autoa ladataan vain kotona 3,7 kW:n teholla.



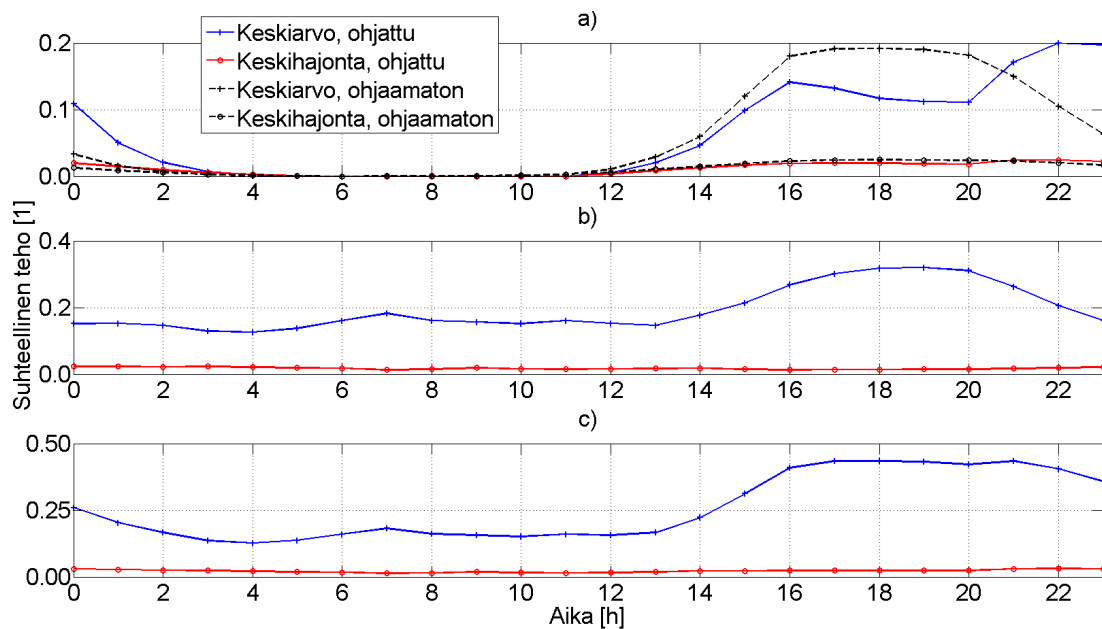
Kuva F3: Sähköautojen viivästämällä ohjatun latauskäyrän (a) summautuminen jakelumuuntajan M3 peruskuormaan (b). Kokonaiskuorma kuvassa (c). Lataus tapahtuu vain kotona 3,7 kW:n teholla. 50 % penetraatio.



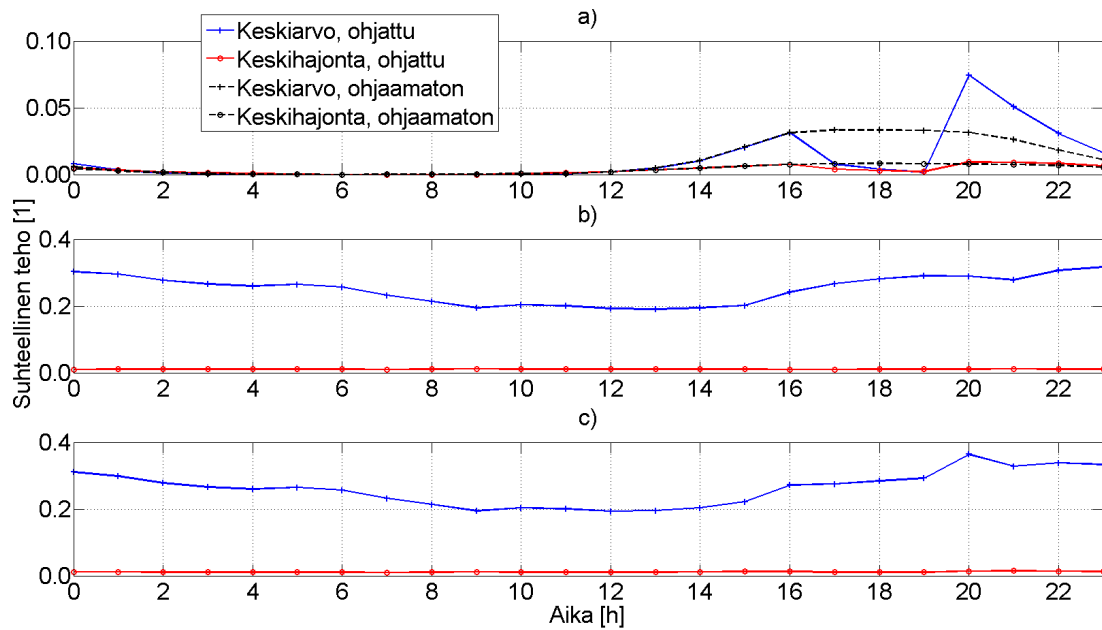
Kuva F4: Sähköautojen viivästämällä ohjatun latauskäyrän (a) summautuminen jakelumuuntajan M3 peruskuormaan (b). Kokonaiskuorma kuvassa (c). Lataus tapahtuu vain kotona 3,7 kW:n teholla. 50 % penetraatio ja vain kolme matkaa vuorokaudessa ajavia autoja ohjataan.



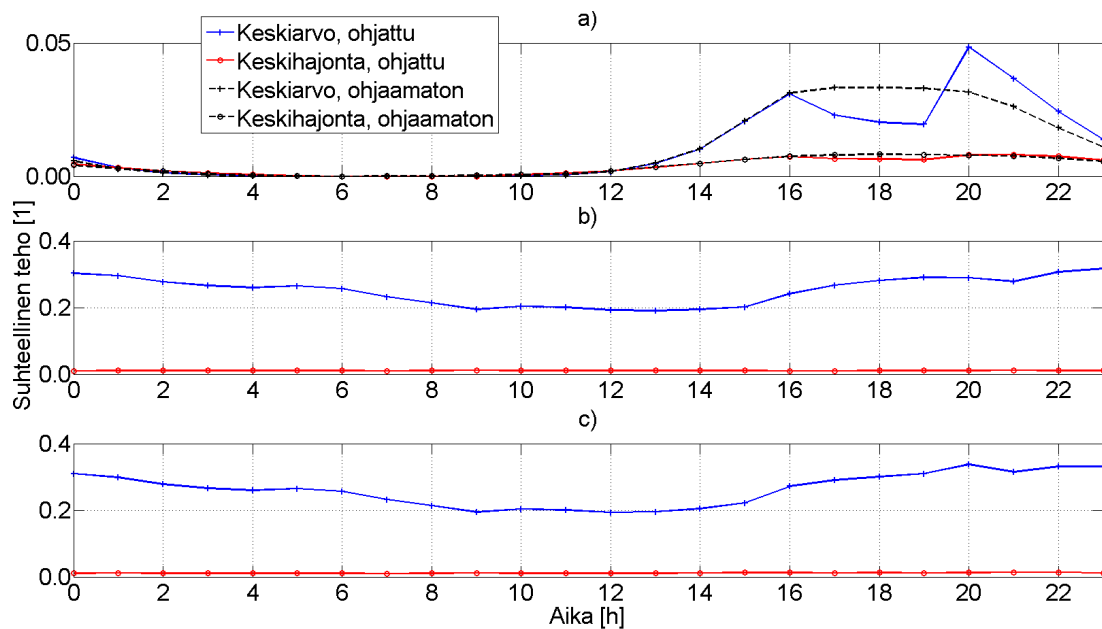
Kuva F5: Sähköautojen viivästämällä ohjatun latauskäyrän (a) summautuminen jakelumuuntajan M14 peruskuormaan (b). Kokonaiskuorma kuvassa (c). Lataus tapahtuu vain kotona 3,7 kW:n teholla. 50 % penetraatio.



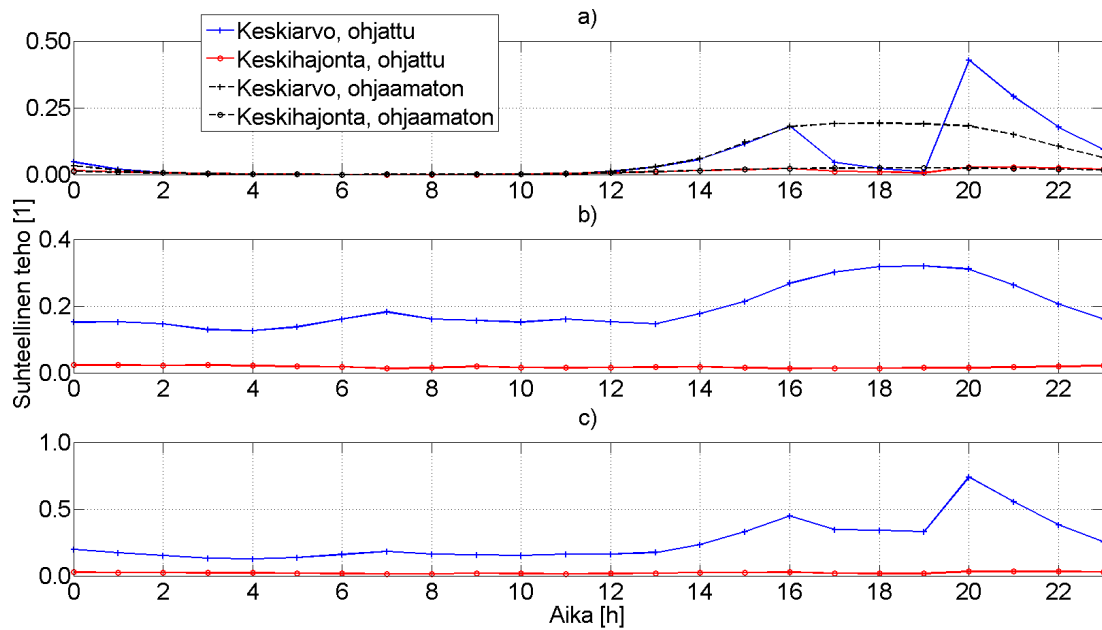
Kuva F6: Sähköautojen viivästämällä ohjatun latauskäyrän (a) summautuminen jakelumuuntajan M14 peruskuormaan (b). Kokonaiskuorma kuvassa (c). Lataus tapahtuu vain kotona 3,7 kW:n teholla. 50 % penetraatio ja vain kolme matkaa vuorokaudessa ajavia autoja ohjataan.



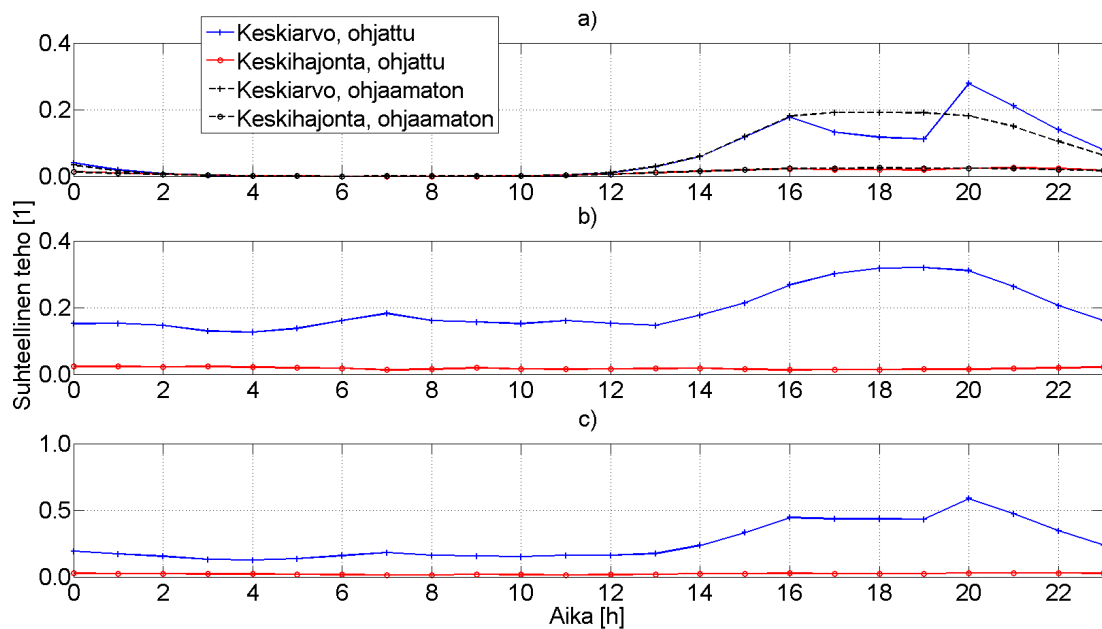
Kuva F7: Sähköautojen hintaohjatun latauskäyrän (a) summautuminen jakelumuuntajan M3 peruskuormaan (b). Kokonaiskuorma kuvassa (c). Lataus tapahtuu vain kotona 3,7 kW:n teholla. 50 % penetraatio.



Kuva F8: Sähköautojen hintaohjatun latauskäyrän (a) summautuminen jakelumuuntajan M3 peruskuormaan (b). Kokonaiskuorma kuvassa (c). Lataus tapahtuu vain kotona 3,7 kW:n teholla. 50 % penetraatio ja vain kolme matkaa vuorokaudessa ajavia autoja ohjataan.



Kuva F9: Sähköautojen hintaohjatun latauskäyrän (a) summautuminen jakelumuuntajan M14 peruskuormaan (b). Kokonaiskuorma kuvassa (c). Lataus tapahtuu vain kotona 3,7 kW:n teholla. 50 % penetraatio.



Kuva F10: Sähköautojen hintaohjatun latauskäyrän (a) summautuminen jakelumuuntajan M14 peruskuormaan (b). Kokonaiskuorma kuvassa (c). Lataus tapahtuu vain kotona 3,7 kW:n teholla. 50 % penetraatio ja vain kolme matkaa vuorokaudessa ajavia autoja ohjataan.